

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciências da Terra

**APLICAÇÃO DE SENSORES DE FIBRAS ÓPTICAS À OBSERVAÇÃO DO  
COMPORTAMENTO DE OBRAS GEOTÉCNICAS**

Por

Ana Maria dos Santos Ribeiro

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Geológica (Geotecnia)

Orientador: Doutor A. Silva Gomes

Co-orientadora: Doutora A. Paula da Silva

Monte da Caparica

2009

*“O futuro não pode ser previsto, mas pode ser inventado. É a nossa habilidade de inventar o futuro que nos dá esperança para fazer de nós o que somos.”* Dennis Gabo, prêmio Nobel de Física em 1971.

## Agradecimentos

Esta dissertação não representa apenas o resultado de extensas horas de estudo, reflexão e trabalho durante as diversas etapas que a constituem. É igualmente o culminar de um objectivo académico a que me propus e que não seria possível sem a ajuda de um número considerável de pessoas, a quem gostaria de agradecer:

- ✧ Ao Professor António Silva Gomes pela amizade, orientação, revisão e crítica. O seu contínuo apoio, orientação e motivação ao longo deste trabalho, foram uma inspiração e motivação para esta tese;
- ✧ À Professora Ana Paula da Silva pela amizade e incentivo na concretização deste trabalho.
- ✧ Ao Doutor Daniele Inaudi, da SMARTEC, pela disponibilidade e colaboração;
- ✧ Ao Eng.º Paulo Silveira, Eng.º Almeida Garrett e Eng.º João António Amante do Laboratório de Engenharia Civil e ao Eng.º Diogo Esteves da Tecnilab pelo apoio e esclarecimentos ao longo deste trabalho;
- ✧ A todos os professores e funcionários do DCT, em particular ao Professor Pedro Lamas pelo constante incentivo e ao Professor Alcino Rodrigues de Carvalho;
- ✧ Aos funcionários da Biblioteca que me acompanharam ao longo do curso e de quem sempre recebi simpatia e amizade;
- ✧ Aos meus pais e irmã por todo o amor, carinho e dedicação com que sempre me apoiaram e por todos os esforços que permitiram concretizar mais esta etapa;
- ✧ Ao Tiago, Catarina, Daniel, Zé, Antunes, Filipe, Ramos, Telma, Paulo, Elisabete, Nuno e todos os colegas e amigos da faculdade e da biblioteca que conheci ao longo do curso e de quem sempre recebi apoio, simpatia e amizade;
- ✧ A todos os meus amigos e familiares, que de uma forma ou de outra, contribuíram para tornar possível a execução deste trabalho.

A todos o meu mais profundo e sentido agradecimento.

## Resumo

As obras geotécnicas, tais como barragens, túneis, taludes, etc., assumem uma grande importância para a sociedade. A garantia da segurança, da funcionalidade e da durabilidade deste tipo de obras implica projectos adequados, a utilização de métodos de controlo de qualidade durante a fase de construção, bem como uma manutenção efectiva durante a fase de serviço.

A observação das estruturas em geral e das obras geotécnicas em particular, tem vindo a adquirir uma importância crescente nas várias fases na vida das obras (projecto, construção, ensaio de carga – quando for o caso – fase de serviço e fase de abandono ou demolição).

O desenvolvimento das tecnologias associadas às fibras ópticas permitiu que, através da propagação da luz, grandes quantidades de dados fossem transmitidas em simultâneo. As múltiplas vantagens que as fibras exibem, quando comparadas com os sistemas de transmissão de dados tradicionais (cabos de cobre), rapidamente mostraram um elevado interesse industrial. No âmbito da transmissão dos dados, através de fibras ópticas, a minimização das perturbações que possam afectar a propagação da luz é essencial. No entanto, se for possível correlacionar perturbações com variações de grandezas físicas, as fibras podem ser utilizadas como sensores. A normalização de processos de fabrico, associada ao enorme incremento das utilizações das fibras ópticas, criou as condições para que fosse possível fabricar sensores de fibra óptica a custos aceitáveis.

As utilizações de sensores de fibra óptica na observação do comportamento de obras geotécnicas revelaram-se uma opção válida, com várias vantagens relativamente aos sensores convencionais. A possibilidade de medições contínuas ao longo da estrutura é um exemplo da valência destes sensores.

A presente dissertação tem como objectivo descrever os principais sensores de fibra óptica aplicáveis à observação do comportamento de obras geotécnicas e relatar casos de estudo em que os mesmos foram aplicados.

**Palavras-chave:** geotecnia, observação, sensores de fibra óptica.

## **Abstract**

Geotechnical works such as dams, tunnels, slopes, etc., assume great importance for society. The guarantee of safety, performance and durability of this type of works requires appropriate projects, the use of methods of quality control during the construction phase, and an effective maintenance during their use.

Observation of structures in general and of geotechnical works in particular, has been acquiring an increasing importance in the various stages in the works life (design, construction, load testing - if applicable - service stage and abandonment or demolition phase).

The development of technologies associated with optical fibers allowed, through the propagation of light, large amounts of data to be transmitted simultaneously. The multiple benefits that fibers exhibit when compared with traditional data transmission systems (copper wires), quickly showed a high industrial interest. In the context of data transmission through optical fibers, the minimization of disturbances that may affect the propagation of light is essential. However, if one can correlate disturbances with physical quantities changes, fiber can be also used as sensors. Standardization of manufacturing processes associated with the huge increase in fiber optics use, has created the conditions for it to be possible to produce fiber optic sensors at an acceptable cost.

Using fiber optic sensors in monitoring the behavior of geotechnical works proved to be a valid option, with several advantages upon the conventional sensors. The possibility of continuous measurements along the structure is an example of these sensors valency.

This dissertation aims to describe the main fiber optic sensors for the observation of geotechnical works behavior and to report case studies in which they were applied.

**Keywords:** geotechnics, observation, optical fiber sensors.

# Índice

Agradecimentos.....	II
Resumo .....	III
Abstract .....	IV
Índice.....	V
Índice de Figuras .....	VII
1. Introdução.....	1
2. Breve História do Desenvolvimento das Fibras Ópticas.....	3
3. Fibras Ópticas como Meio de Transporte de Sinal.....	9
3.1. Noção Teórica .....	12
4. Sensores de Fibra Óptica .....	23
4.1. Estado da Arte.....	23
4.2. Noção de um Sensor de Fibra Óptica.....	25
4.3. Classificação de Sensores de Fibra Óptica.....	27
4.3.1. Com base na medição.....	28
4.3.2. Com base na modulação.....	30
4.3.3. Com base a localização dos pontos de medida.....	45
4.4. Sensores mais utilizados em obras geotécnicas.....	48
4.4.1. Sensores de fibra óptica utilizando redes de Bragg.....	49
4.4.2. Sensores de fibra óptica distribuídos: efeito de Raman e Brillouin.....	57
4.4.3. Interferómetro Fabry-Perot .....	61
4.4.5. Microdobragem.....	64
5. Instrumentação de Obras Geotécnicas.....	67
5.1. Barragens.....	70
5.2. Túneis.....	72
5.3. Taludes.....	75

6. Aplicação de Sensores de Fibra Óptica a Obras Geotécnicas .....	79
6.1. Casos de obras geotécnicas .....	82
6.1.1. Barragens.....	82
6.1.2. Túneis.....	86
6.1.3. Taludes.....	89
6.2. Outros casos .....	93
6.2.2. Infra-estruturas Ferroviárias.....	93
6.2.3. Pontes .....	96
6.2.6. Oleodutos.....	98
7. Perspectivas .....	101
7.1. Medição de deformações ao longo de galerias enterradas com circulação de produtos agressivos .....	101
7.2. Medição de movimentos de juntas e de extensões ao longo de galerias de barragens.....	104
7.3. Medição de movimentos de juntas e de fissuras nos paramentos de montantes de barragens .....	106
8. Considerações finais .....	109
Referências Bibliográficas .....	111
Glossário .....	117

# Índice de Figuras

Figura 2.1 - Experiência de John Tyndall (adaptado de Goff e Hansen, 2002).....	3
Figura 3.1 - Elementos de uma ligação por fibra óptica (ISCTE, s.d.).....	9
Figura 3.2 – Fibras ópticas em escala real (Narbonneau, 2008).....	12
Figura 3.3 – Constituição de uma fibra óptica (Duque, s. d.).....	12
Figura 3.4 - Propagação do feixe luminoso (adaptado de Sanguanpong, 2000). ....	13
Figura 3.5 - Lei de Snell – Descartes (ISCTE, s. d.).....	15
Figura 3.6 – Esquematização da radiação incidente transmitida pela fibra (ISCTE, s. d.).....	16
Figura 3.7 - Representação Esquemática das Fibras Multimodais e Propagação dos Respetivos Feixes Luminosos (adaptado de Moreira, 2005).....	17
Figura 3.8 – Representação Esquemática de uma Fibra Monomodal e da Propagação do Feixe Luminoso (adaptado de Moreira, 2005). ....	18
Figura 4.1 - Circuito analógico. ....	29
Figura 4.2 - Circuito digital. ....	29
Figura 4.3 - Sensores de fibra óptica baseada na intensidade e abertura numérica (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008).....	30
Figura 4.4 - Sensor baseado na microdobragem (Gholamzadeh e Nabovati, 2008). ....	31
Figura 4.5 – Sensor de fibra óptica com base na reflexão (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008). ....	32
Figura 4.6 - Sensor de fibra óptica acoplamento de luz evanescente (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008).....	33
Figura 4.7 – Sensor de fibra óptica utilizando um corpo negro (adaptado de Yu, 2002). ....	34
Figura 4.8 - Estrutura típica de um sensor óptico de temperatura, baseado na absorção de cristais semicondutores (adaptado de Bortoni <i>et al.</i> , 2007).....	35
Figura 4.9 - Dois tipos de sensores de fibra óptica baseados na fluorescência mais utilizados (adaptado de Yu, 2002).....	35
Figura 4.10 - Ondas de interferência construtiva e destrutiva. ....	39
Figura 4.11 - Franjas (PASCAL, 1990). ....	39
Figura 4.12 - Interferómetro de Michelson (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008). ....	41
Figura 4.13 – Modelo de interferência produzido com um interferómetro de Michelson (Wikipédia s. d.).....	41
Figura 4.14 - Interferómetro Mach-Zehnder (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008). ....	42
Figura 4.15 – Interferómetro de Sagnac (adaptado de Wikipédia, s. d.). ....	44
Figura 4.16 - Interferómetro Fabry-Perot (adaptado de PASCAL, 1990). ....	45
Figura 4.17 - Métodos de multiplexagem por divisão de tempo podem ser utilizados em combinação com sensores de microdobragem de fibra óptica para localizar a ocorrência de alterações do estado de tensão em juntas de ligação localizadas ao longo de um oleoduto (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008). ....	46
Figura 4.18 – Definição de uma rede de Bragg numa fibra óptica (adaptado de Yu, 2002). ....	49



Figura 4.19 – Representação esquemática de uma rede de Bragg em fibra óptica (adaptado de Doyle, 2003). .....	50
Figura 4.20 – Fixação directa de FGB (adaptado de Inaudi <i>et al</i> , 2004). .....	52
Figura 4.21 – Fixação indirecta de FGB (adaptado de Inaudi <i>et al</i> , 2004). .....	52
Figura 4.22 - Esquematização, equipamento e operação do princípio do comprimento de onda por multiplexagem (adaptado de Doyle, 2003). .....	55
Figura 4.23 - Sistema de divisão de multiplexagem por tempo. a) fonte de luz; b) acoplador; c) detector; d) fibra óptica; e) FBG (adaptado de Doyle, 2003). .....	56
Figura 4.24 - Representação esquemática do espectro da luz difundida a partir de uma única onda do sinal de propagação em fibras ópticas (adaptado de Glisic e Inaudi, 2006). .....	57
Figura 4.25 - Medição distribuída (adaptado de Inaudi, 2009). .....	60
Figura 4.26 – Pormenor do Interferómetro Fabry-Perot (adaptado de Frazão <i>et al.</i> , 2007). .....	61
Figura 4.27 – Interferómetro de Fabry-Perot (adaptado de Inaudi, 2009). .....	62
Figura 4.28 – Interferómetro Fabry-Perot para a medição de extensões (adaptado de Inaudi, 2009). .....	62
Figura 4.29 – Interferómetro Fabry-Perot para a medição de temperatura (adaptado de Inaudi, 2009). .....	63
Figura 4.30 - Interferómetro Fabry-Perot para a medição de pressão. ....	63
Figura 4.31 - Interferómetro Fabry-Perot para medição de deslocamento. ....	64
Figura 4.32 – Microdobragem (adaptado de Brunner, 2004). ....	65
Figura 6.1 – Instalação de fibras ópticas (adaptado de Johansson e Sjö Dahl, 2004). ....	84
Figura 6.2 – Localização das fibras ópticas na barragem de Lövön (adaptado de Johansson e Sjö Dahl, 2004). .....	84
Figura 6.3 - Temperatura estimada na parte saturada da barragem de El 273.8m de 276m, em 1999 (linhas sólidas) e em 2004 (ponto marcadores). As medições indicam infiltração concentrada em 0/028 (adaptado de Johansson e Sjö Dahl, 2004). .....	85
Figura 6.4 – Perfil do túnel de Shimakawahara (adaptado de Inaudi <i>et al</i> , 2004). ....	87
Figura 6.5 – Configuração dos sensores (adaptado de Inaudi <i>et al</i> , 2004). ....	87
Figura 6.6 – Ligação dos sensores (adaptado de Inaudi <i>et al.</i> , 2004). ....	88
Figura 6.7 – Caixa de protecção (Inaudi <i>et al</i> , 2004). ....	88
Figura 6.8 – Fim da protecção do sensor (Inaudi <i>et al.</i> , 2004). ....	88
Figura 6.9 – Modelo de estudo de deslizamentos de terrenos e assentamentos (adaptado de Inaudi, 2009). ....	89
Figura 6.10 – Gráfico comparativo dos resultados do sistema DTSS e sensor pontual (adaptado de Farhadiroushan <i>et al.</i> , s. d.). .....	90
Figura 6.11 – Indução da tensão aplicada para o teste (adaptado de Farhadiroushan <i>et al.</i> , s. d.). ....	91
Figura 6.12 – Ensaio de deslizamento e de subsidência induzidos (adaptado de Farhadiroushan <i>et al.</i> , s. d.). .....	92

Figura 6.13 – Resultado das medições através de DTSS para deslizamento e subsidência de terras (adaptado de Farhadiroushan <i>et al.</i> , s. d.).	92
Figura 6.14 – Posição do sensor de fibra óptico no carril (adaptado de Sensornet, s. d.).	94
Figura 6.15 – Travessa de madeira que substitui um de betão (adaptado de Sensornet, s. d.).	94
Figura 6.16 – Tensões capturadas pelo DTSS (adaptado de Sensornet, s. d.).	95
Figura 6.17 – Ponte Versoix, vista geral e colocação dos sensores numa secção transversal típica (adaptado de Bergmeister <i>et al.</i> , s. d.).	97
Figura 6.18 – Deslocamentos verticais calculados a partir da curvatura das medições de SOFO comparando com os extensómetros (adaptado de Bergmeister <i>et al.</i> , s. d.).	98
Figura 6.19 – Mapa da instalação do cabo DTS para o teste de detecção de fugas de gás (adaptado de Sensornet, s. d.).	99
Figura 6.20 - Estrutura feita para a instalação dos cabos de DTS á volta do oleoduto (adaptado de Sensornet, s. d.).	100
Figura 6.21 – Variação de temperatura no oleoduto com o tempo, devido à fuga exibida (adaptado de Sensornet, s. d.).	100
Figura 7.1 - “Cratera” gerada no pavimento após o aluimento de terras originada pela rotura do hasteal direito do Caneiro (fotografia tirada pelo jornal Expresso em Novembro de 2003, logo após o acidente).	102
Figura 7.2 – Esquematização de sensores de fibras ópticas num túnel.	103
Figura 7.3 – Barragem de Varosa (INAG, s. d.).	104
Figura 7.4 – Galeria da barragem (adaptado de INAG, s. d.).	105
Figura 7.5 – Barragem do Alto Lindoso (INAG, s. d.).	106
Figura 7.6 – Vista do paramento montante da barragem Alto Lindoso com os cabos de sensores de fibra óptica distribuídos para a medição de extensões nas juntas e nas fissuras (adaptado de INAG, s. d.).	107
Figura 7.7 – Barragem de Paradela (INAG, s. d.).	107
Figura 7.8 - Vista do paramento montante da barragem de Paradela com os cabos de sensores de fibra óptica distribuídos para a medição de extensões instalados (adaptado de INAG, s. d.).	108

## 1. Introdução

A presente dissertação enquadra-se no Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia), da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e pretende dar a conhecer as aplicações de sensores de fibra óptica na observação do comportamento de obras.

A escolha do tema desta dissertação teve origem na reduzida informação existente em Portugal sobre o mesmo. Este estudo pretende assim contribuir para a divulgação, no país, desta nova tecnologia, fomentando a comparação das soluções convencionais com as que resultem da aplicação dos sensores de fibra óptica, em termos da relação benefício/custo, sem descurar, por um lado, a necessidade de inovar e, por outro, a experiência acumulada e comprovada dos sensores convencionais.

Para a elaboração do trabalho, que abrange aspectos de índole teórica e apresentação de aplicações, foram consultadas inúmeras fontes bibliográficas, nomeadamente publicadas por especialistas de renome mundial, que, dado o carácter do tema se revelaram indispensáveis para uma apresentação minimamente suportada desta tecnologia.

Apesar do relativamente escasso período de tempo que decorreu desde as suas primeiras aplicações, a utilização de sensores de fibra óptica é já uma realidade em vários países. Em Portugal, embora se assista ainda a algumas reservas, que se podem considerar naturais face à existência de uma experiência consolidada e geralmente bem sucedida com a aplicação dos sensores convencionais, já foram aplicados sensores de fibra óptica em algumas estruturas, iniciando-se assim uma “abertura” para a sua introdução na observação de obras geotécnicas.

Atendendo ao exposto, a presente dissertação tem como principal objectivo resumir o estado da arte dos sensores de fibra óptica em obras geotécnicas e estabelecer o “diálogo” possível entre uma ciência complexa (a optoelectrónica) e a ciência que interessa essencialmente ao “utilizador” dos sensores, nomeadamente no âmbito da observação das obras geotécnicas. Na parte final da dissertação são descritos alguns casos de obra onde estes sensores foram aplicados com sucesso.

Os temas abordados no presente trabalho foram organizados em 8 capítulos:

No presente capítulo tem como objectivo, na sequência do enquadramento genérico da dissertação, a apresentação da estrutura do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se uma breve história do desenvolvimento das fibras ópticas e a evolução dos sensores de fibra óptica, desde o início da transmissão guiada até ao enorme progresso registado na indústria electrónica que permitiu a disponibilização de equipamentos de grande sensibilidade capazes de detectar ínfimas variações nas propriedades físicas da fibra óptica quando submetida a pequenas perturbações.

O terceiro capítulo descreve a transmissão de dados através de fibras ópticas, demonstrando, através de leis da geometria óptica, como esta transmissão se processa através da propagação de luz.

No quarto capítulo é feita uma revisão do estado da arte dos sensores de fibra óptica: tipo de sensores, princípios de funcionamento e, ainda, sensores mais utilizados em obras geotécnicas.

O capítulo cinco aborda a importância da observação de obras geotécnicas na fase de construção, ensaio de carga e na fase de serviço. Inclui uma breve descrição da observação de obras geotécnicas, nomeadamente barragens, túneis e taludes.

No capítulo seis mencionam-se casos em Portugal em que os sensores de fibra óptica foram utilizados e são descritos casos de obra em que foram utilizados sensores de fibra óptica na sua instrumentação.

O capítulo sete apresenta perspectivas de possíveis utilizações dos sensores de fibra óptica, até hoje impossíveis com os sensores convencionais.

Por fim, o oitavo capítulo apresenta as principais considerações que resultam da dissertação e da consulta bibliográfica.

## 2. Breve História do Desenvolvimento das Fibras Ópticas

Os primeiros sistemas de comunicação óptica remontam a 1790, quando o francês Claude Chappe<sup>1</sup> inventou o telégrafo óptico, embora a primeira investigação acerca da transmissão guiada de luz date de 1870, quando John Tyndall<sup>2</sup> realizou uma experiência utilizando um jacto de água que fluiu a partir de um recipiente para outro e um feixe de luz. A luz<sup>3</sup>, por reflexões internas sucessivas seguiu um caminho específico, sendo assim demonstrada a possibilidade de transmissão da luz guiada (Goff e Hansen, 2002).



**Figura 2.1 - Experiência de John Tyndall (adaptado de Goff e Hansen, 2002).**

Esta simples experiência, ilustrada na figura 2.1, marcou a primeira investigação sobre a transmissão da luz guiada, podendo-se observar que a luz seguiu um caminho em ziguezague no interior do percurso curvo de um jacto da água.

---

<sup>1</sup> Claude Chappe (1763 - 1805) - abade, engenheiro e inventor francês, criador do primeiro sistema óptico de comunicação.

<sup>2</sup> John Tyndall (1820 - 1893) - físico inglês que demonstrou a difusão da luz através das suspensões coloidais.

<sup>3</sup> Todos os termos em *itálico* encontram-se definidos no glossário apresentado em anexo.

Em 1880 Alexander Graham Bell<sup>4</sup> desenvolveu um sistema de transmissão óptica de voz, o Fotofen, utilizando o espaço livre de luz para transportar a voz humana até 200 metros. O sistema convertia sinais de voz em sinais ópticos, utilizando a luz do sol e lentes montadas num receptor que vibrava por efeito das ondas sonoras (Goff e Hansen, 2002).

No entanto, o telefone, o seu invento primário, revelou-se, para a época, mais exequível, tendo-se desenvolvido a um nível quase industrial, ao contrário do Fotofen que, apesar de ter constituído uma notável invenção, não foi objecto de aplicações industriais.

Muito mais tarde, em 1950, registou-se um enorme progresso nas tecnologias de fibra óptica com o desenvolvimento de instrumentos que transmitiam imagens a partir do interior de corpos (endoscópicos). Este tipo de dispositivo, inicialmente desenvolvido por Brian O'Brien<sup>5</sup>, utilizou a primeira fibra óptica toda em vidro; no entanto, devido à grande perda de sinal as distâncias de transmissão eram limitadas (Goff e Hansen, 2002).

Este problema levou a que, em 1954, Van Heel<sup>6</sup> desenvolvesse uma fibra óptica que incluía um revestimento, com um nível de *refracção* mais baixo do que o da fibra, impedindo a saída do sinal para fora desta, obrigando, por isso, a que os feixes luminosos se mantivessem no interior da fibra. Após seis anos de desenvolvimento, foi fabricada uma fibra óptica com uma perda de um *decibel* por metro, valor aceitável para uso médico, mas ainda demasiado elevado para o domínio das comunicações (Goff e Hansen, 2002).

Em 1957, Gordon Gould<sup>7</sup> fomentou a ideia de fazer percorrer um raio *laser*<sup>8</sup> através de uma fibra óptica. Em 1962 foi criado pela primeira vez o raio laser *semicondutor*, actualmente o mais utilizado no domínio da óptica. Devido a sua alta capacidade de *frequência de modulação*, depressa se apercebeu a importância do raio laser como um meio de transporte de informação. Como o raio laser não é ajustado para

---

<sup>4</sup> Alexander Graham Bell (1847 - 1922) - cientista e inventor escocês, inventou o telefone e fundou a companhia telefónica Bell.

<sup>5</sup> Brian O'Brien (1898 – 1992) – cientista americano

<sup>6</sup> Van Heel (1899 – 1966) – físico holandês que estudou o problema das perdas da luz através das fibras ópticas, desenvolvendo o revestimento para a fibra de vidro.

<sup>7</sup> Gordon Gould (1920 - 2005) - físico americano inventor do laser.

<sup>8</sup> Acrónimo em inglês significa **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, ou seja, Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação.

transmissão através do ar livre, por ser afectado pelas variações das condições ambientais, a fibra óptica surgiu, em 1966, como alternativa, revelando-se um meio de transmissão conveniente. No entanto, para ser viável a fibra óptica teria de ser composta por vidro puro, de forma a não haver perdas devido a impurezas do material (Goff e Hansen, 2002).

Da pesquisa intensiva, conduzida por vários cientistas, para a purificação do vidro, resultou, no Verão de 1970, a obtenção, por Robert Maurer<sup>9</sup>, Donald Keck<sup>10</sup> e Peter Schultz<sup>11</sup>, de uma fibra óptica do vidro mais puro até então fabricado, utilizando sílica fundida a um alto ponto de fusão. Essa fibra possuía um baixo *índice de refração*, exibindo uma *atenuação* inferior a 20 decibéis por quilómetro, considerado como constituindo o limiar para tornar uma fibra óptica numa tecnologia viável, capaz de transportar 65 000 vezes mais informação do que um fio de cobre. Dois anos depois os mesmos cientistas inventaram a fibra óptica multimodal, capaz de suportar mais do que uma onda de luz, com uma perda de 4 decibéis por quilómetro (Goff e Hansen, 2002).

Em Abril de 1977, a General Telephone and Electronics ensaiou e implementou, na Califórnia, a primeira linha de telefone através de um sistema de fibra óptica. Imediatamente no mês seguinte, a companhia Bell cobriu a zona da baixa da cidade de Chicago com um sistema idêntico. Actualmente, mais de 80 por cento do trânsito mundial de voz e dados de longa distância, é assegurado por cabos de fibra óptica (Goff e Hansen, 2002).

O desenvolvimento da *fonte* emissora e do *receptor* da fibra óptica foi, inicialmente, lento, tendo mesmo sido utilizadas tecnologias desenvolvidas por outras razões. A primeira fonte emissora para fibra óptica foi conseguida através do indicador visível *LED*<sup>12</sup>, desenvolvidas em 1976, devido à crescente exigência de maior *velocidade de comutação* e de *comprimentos de onda* mais apropriados e maior qualidade de produção (Goff e Hansen, 2002).

A fibra óptica constitui um avanço tecnológico extraordinário que contribuiu para o desenvolvimento das telecomunicações em todo o mundo. De facto, e a título de

---

<sup>9</sup> Robert Maurer (1924 - ) físico americano que liderou a invenção da fibra óptica usada actualmente.

<sup>10</sup> Donald Keck ( 1941 - ) co-inventor da fibra óptica usada actualmente.

<sup>11</sup> Peter Schultz - (1942 - ) co-inventor da fibra óptica usada actualmente.

<sup>12</sup> LED - acrónimo em inglês para Light Emitting Diode, ou Diodo Emissor de Luz.

exemplo, num par de cabos de fibra óptica podem ser transmitidas mais de um milhão de mensagens simultâneas. A transmissão por fibras ópticas foi introduzida na rede de telecomunicações portuguesas em 1983.

Os primeiros sensores ópticos para aplicações em instrumentação eram constituídos por uma vasta gama de mecanismos bastante delicados que exigiam um alinhamento óptico perfeito para que a transmissão de dados fosse possível. Acontece, no entanto, que esse alinhamento era susceptível de ser alterado devido às próprias perturbações que se pretendiam medir, uma vez que, ao mínimo deslocamento do sensor, a transmissão das leituras era interrompida. Esta característica conferia a este sistema um baixo grau de fiabilidade. Pelo contrário, e atendendo a que a transmissão através das fibras ópticas não depende do seu alinhamento óptico (como provou Tyndall na sua experiência), a sua utilização tornou possíveis ligações fiáveis entre vários instrumentos ópticos, eliminando os problemas associados à perturbação do alinhamento e possibilitando a medição de grandezas à distância (Ribeiro, 1996).

Os primeiros sensores de fibra óptica, que se consideram como o início da instrumentação, foram os giroscópios, mostrando através de experiências que a gama de grandezas físicas que poderiam ser medidas com sensores de fibra óptica era vasta. Nos primeiros tempos, previam-se vários tipos de aplicações para esta tecnologia, designadamente no âmbito de sensores industriais. No entanto, o elevado custo dos sensores restringiu as aplicações a um reduzido número de indústrias a que correspondiam as áreas mais importantes de monitorização, tais como a instrumentação em medicina, em sistemas de defesa e em aeronáutica. Posteriormente, as aplicações estenderam-se à monitorização ambiental e, mais recentemente, à instrumentação em engenharia civil. Às aplicações aos sistemas de telecomunicações devem-se, no entanto, os maiores avanços no desenvolvimento das fibras e dos sensores ópticos. Actualmente, com a expansão da rede de comunicações a nível mundial, há uma maior disponibilidade de componentes ópticos e electrónicos que associam elevada qualidade a custos razoáveis (Ribeiro, 1996).

Nos últimos anos a indústria electrónica disponibilizou equipamentos de grande sensibilidade capazes de detectar ínfimas variações nas propriedades físicas da fibra óptica quando submetida a pequenas alterações, tornando possível medir, entre outras grandezas, deformações, temperaturas, deslocamentos, extensões, pressões, acelerações (Ribeiro, 1996). Por outro lado, os sensores de fibra óptica são uma opção cada vez mais válida para estruturas cuja monitorização tem de ser realizada em tempo real envolvendo, por vezes, grandes distâncias, o que o desenvolvimento de



técnicas de medição óptica a partir dos anos 70 e de fibras ópticas com baixas perdas e alta qualidade para uso em telecomunicações viabilizou.



### 3. Fibras Ópticas como Meio de Transporte de Sinal

O transporte de sinais utilizando fibras ópticas faz-se através de um circuito óptico, constituído por elementos ligados por fibras ópticas.

Na figura 3.1 representa-se um esquema típico da transmissão de sinais por fibra óptica.

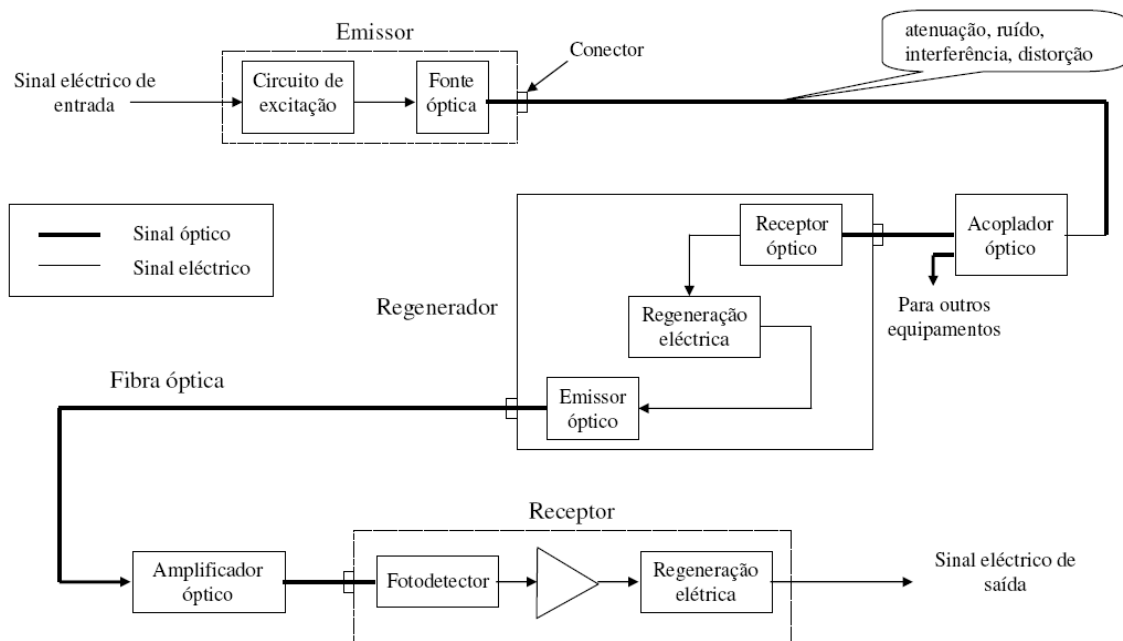


Figura 3.1 - Elementos de uma ligação por fibra óptica (ISCTE, s.d.).

O emissor (*fotoemissor*) que converte sinais eléctricos em sinais luminosos, um cabo que proteja mecânica e ambientalmente as fibras ópticas contidas no seu interior e um receptor são os elementos mais importantes de um circuito óptico, podendo existir componentes adicionais, nomeadamente o *regenerador* e o *amplificador* (Moreira, 2005).

A luz, na forma como a conhecemos, é uma gama de comprimentos de onda a que o olho humano é sensível. Trata-se de uma *radiação electromagnética* pulsante ou, num sentido mais lato, de qualquer radiação electromagnética que se situe entre as radiações infravermelhas e as radiações ultravioletas. As três grandezas físicas

básicas da luz (e de toda a radiação electromagnética) são: a *amplitude*, a *frequência* e a *polarização*. Um *feixe luminoso* é a visualização da trajectória da luz em determinado espaço, que indica de onde a luz sai (emissor) e para onde ela se dirige (detector). O feixe procura o caminho mais favorável á sua propagação, o que permite a manipulação, através de dispositivos, da trajectória pretendida.

A fibra óptica é um longo e fino fio de vidro, muito puro, que tem aproximadamente o diâmetro de um cabelo humano, possuindo duas camadas, o núcleo e bainha, com índices de refacção diferentes, o que permite a transmissão do feixe luminoso através de reflexões consecutivas ao longo do distanciado percurso entre o emissor e o detector, transportando assim a informação.

Quando a luz absorvida pela bainha não é significativa, o feixe luminoso pode percorrer grandes distâncias. No entanto, parte dele degrada-se ao longo da fibra devido principalmente a impurezas no vidro. A extensão da degradação do sinal luminoso depende da pureza do vidro e do comprimento de onda da luz transmitida.

A fibra óptica actua como um *guia de feixes luminosos*. A luz emitida numa das extremidades, percorre a fibra até à extremidade oposta onde é decodificada pelo receptor. Em certas condições, este percurso pode atingir centenas de quilómetros sem necessidade de regeneração do sinal.

Para assegurar a ligação entre continentes, os cabos de fibra óptica atravessam oceanos, o que implica a instalação de cabos com milhares de quilómetros de extensão sobre a superfície do fundo do mar, atravessando fossas e contornando montanhas submarinas. O primeiro cabo de fibra óptica intercontinental usando *circuitos digitais*, então com capacidade para 40 000 conversas telefónicas simultâneas, ficou operacional em 1988. Desde então, a capacidade dos cabos aumentou, tendo alguns cabos que atravessam o oceano Atlântico capacidade para 200 milhões de circuitos telefónicos.

Embora a fibra óptica possa ser de plástico transparente, de vidro, ou de uma combinação destes dois materiais, as fibras utilizadas em aplicações de telecomunicações de longa distância são sempre de vidro devido à menor atenuação óptica.

Em curtas distâncias, como no interior de um edifício, a fibra óptica economiza espaço, dado que um único cabo de fibra óptica transporta muito mais dados do que vários cabos em cobre. Atendendo à sua imunidade a interferências electromagnéticas e

devido à sua característica dielétrica, torna-se uma boa solução para proteger comunicações localizadas em ambientes de alta tensão bem como os efeitos de tempestades elétricas.

O desenvolvimento das fontes luminosas (fotoemissores) e dos receptores luminosos (*fotodetectores*), dispositivos fabricados com materiais semicondutores (Pereira, 2008), que se processou em paralelo com o desenvolvimento das fibras ópticas, potenciou as suas aplicações.

As fontes devem possuir potência de emissão de luz compatível com os percursos entre essas fontes e os receptores, variar o mínimo possível com as condições do meio e tornar viável o *acoplamento* da luz na fibra, através das lentes convergentes ou de outros métodos.

Há dois tipos básicos de fontes luminosas: os *diodos* emissores de luz (LED) e o diodo *laser* (Lentilucci, 1993). A diferença entre eles é que nos LED's as recombinações são espontâneas, enquanto que no diodo laser elas são estimuladas. Uma das técnicas usadas no diodo laser para obter essa estimulação consiste na colocação de dois espelhos rigorosamente paralelos, de tal forma que ocorra interferência construtiva entre ondas sucessivamente construtivas, até que a potência desejada seja atingida e o laser atravesse um dos espelhos.

Os LED's são mais simples, baratos e confiáveis, mas possuem um espectro mais largo de luz gerada com uma *emissão incoerente*, menor eficiência de acoplamento de luz na fibra e limitações na velocidade de modulação. Os diodos laser, por sua vez, geram uma radiação mais *coerente*, com espectro mais estreito e feixe mais direccionado, com maiores potências.

A função dos receptores luminosos (*fotodetectores*) é o de absorver a luz transmitida através da fibra e convertê-la em corrente elétrica para processamento. Os *fotodetectores* aplicados devem ter um alcance igual ou superior ao da luz recebida. A conversão de luz em corrente é obtida utilizando a energia do fóton que ao excitar electrões da camada de valência de um semicondutor (*fotoionização*), os liberte colocando-os em movimento, o que caracteriza a corrente (Lentilucci, 1993).

A eficiência de um receptor mede-se verificando a razão entre o sinal e o ruído. Isso ocorre porque a potência óptica que é recebida pode ser da ordem dos *nanowatts*, o que torna necessária a amplificação do sinal. Assim, a eficiência de um fotodetector é determinante para a amplificação do sinal, sem gerar ruído novo que a prejudique.

### 3.1. Noção Teórica

Uma fibra óptica (figura 3.2) é um filamento, usualmente em vidro, que pode ser atravessado por um feixe luminoso, percorrendo-o através de reflexões consecutivas.



Figura 3.2 – Fibras ópticas em escala real (Narbonneau, 2008).

A estrutura de uma fibra óptica (figura 3.3) é cilíndrica, composta por um núcleo, a parte central da fibra por onde se dá a propagação da luz até ao seu destino, envolvido por uma bainha e por um revestimento. A bainha é o material óptico exterior que envolve o núcleo e que reflecte a luz para o seu interior, eliminando ou limitando a refração da luz e protegendo simultaneamente o núcleo. O revestimento é uma cobertura de plástico que protege a fibra óptica de influências externas que a possam danificar bem como das condições ambientais, especialmente quando agressivas (OFSEMT, s. d.).

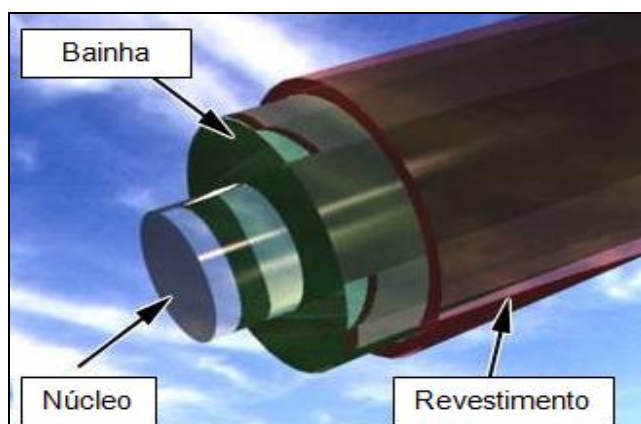


Figura 3.3 – Constituição de uma fibra óptica (Duque, s. d.).

Como o diâmetro da fibra óptica é grande relativamente ao comprimento de onda da luz, a propagação dos feixes luminosos obedece às leis da *geometria óptica*. Estas leis utilizam um tratamento simples que ignora a natureza ondulatória da luz, considerando a sua propagação segundo raios luminosos que representam a direcção da propagação da onda electromagnética (figura 3.4).

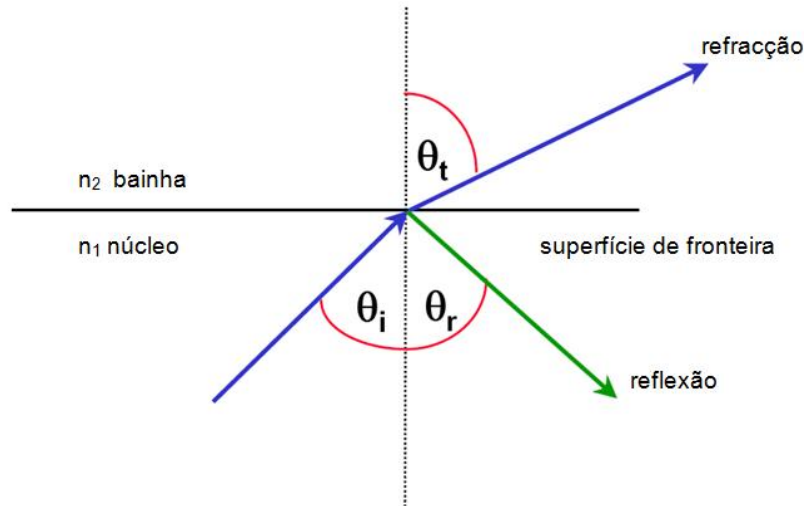


Figura 3.4 - Propagação do feixe luminoso (adaptado de Sanguanpong, 2000).

Atendendo a que o índice de refração do núcleo,  $n_1$ , é superior ao índice de refração da bainha,  $n_2$ , a propagação da luz é feita no interior do núcleo, através de múltiplas reflexões na fronteira de separação entre o núcleo e a bainha (Lentilucci, 1993),

O desvio que a luz sofre quando passa de um meio para outro, depende da velocidade de propagação da luz nos dois meios. A grandeza física que relaciona as velocidades nos dois meios, é o índice de refração ( $n$ ), que é definido como sendo a razão entre a velocidade da luz num meio ( $n_2$ ) e a velocidade da luz num outro meio ( $n_1$ ) (Hecht, 1987):

$$n = n_2 / n_1 \quad (3.1)$$

A reflexão consiste na mudança de direcção da propagação do feixe luminoso, que regressa à região de onde ele é oriundo (núcleo), após entrar em contacto com uma superfície reflectora (bainha). A reflexão difere da refração pois nesta verifica-se um desvio do feixe luminoso para um outro meio após entrar em contacto com a superfície que separa os dois meios (Reinhard, 2000).

As duas leis de reflexão são as seguintes:

- o raio incidente, o raio reflectido e a normal à superfície reflectora no ponto de incidência são co-planares;
- o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão

Quando há reflexão dos raios luminosos, o *ângulo de incidência* do feixe e o *ângulo de reflexão* são, por isso, iguais (Hecht, 1987):

$$\theta_i = \theta_r \quad (3.2)$$

Esta lei traduz uma *reflexão interna total* dos feixes incidentes na fibra óptica.

A lei da refacção recebeu o nome dos dois cientistas, Snell<sup>13</sup> e Descartes<sup>14</sup>, que apesar de terem trabalhado independentemente, chegaram ao mesmo resultado, que relaciona os ângulos de incidência e de refacção. Segundo a *Lei de Snell - Descartes* (figura 3.5) a razão entre o seno do ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) e o seno do *ângulo de refacção* ( $\theta_t$ ) é constante e igual ao índice de refacção relativo ( $n$ ) (Hecht, 1987).

$$\sin \theta_i / \sin \theta_t = n = n_2 / n_1 \quad (3.3)$$

$$\sin \theta_i n_1 = \sin \theta_t n_2 \quad (3.4)$$

$$\sin \theta_i = (\sin \theta_t n_2) / n_1 \quad (3.5)$$

Quando  $n_2 > n_1$ , ou seja, quando o segundo meio é mais denso opticamente, a luz refractada aproxima-se da normal à superfície; quando  $n_2 < n_1$ , acontece o contrário - a luz é desviada em direcção à interface.

---

<sup>13</sup> Snell (1580 – 1626) - matemático e astrónomo holandês, mais conhecido pela lei da refacção agora conhecida como a lei de Snell.

<sup>14</sup> Descartes (1596 - 1650) - filósofo, matemático, cientista e escritor francês.



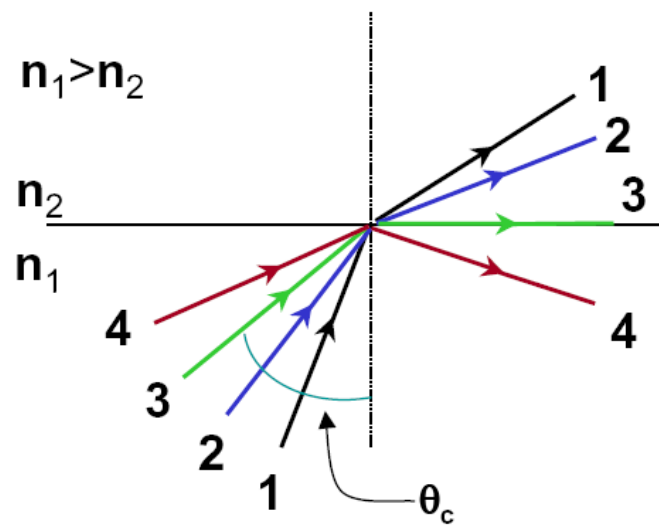


Figura 3.5 - Lei de Snell – Descartes (ISCTE, s. d.).

Se o ângulo de incidência for tal que, substituído na Lei de Snell, resulte num valor de  $\sin \theta_c = 1$ , o que acontece é que a luz é reflectida de novo para o primeiro meio - não existe transmissão de luz em (2) (Amorim, 2002). Diz-se que a luz sofre reflexão interna total, o que acontece para todos os ângulos de incidência superiores a um *ângulo crítico*,  $\theta_c$ : este ângulo crítico corresponde a um ângulo de refração de  $90^\circ$ :

$$\sin \theta_c = (\sin \theta_t \cdot n_2) / n_1 \quad (3.6)$$

$$\sin \theta_c = (\sin 90^\circ \cdot n_2) / n_1 \quad (3.7)$$

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1 \quad (3.8)$$

Desta forma, o ângulo crítico para uma reflexão interna total pode ser obtido através da lei Snell – Descartes (Hecht, 1987).

A definição de ângulo crítico pode ser utilizada para calcular as dimensões do *cone de aceitação* de luz de uma fibra óptica. A luz incide na interface núcleo – bainha segundo um valor máximo  $\theta_{\max}$ , do ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) para qual o raio interno incide segundo um ângulo crítico ( $\theta_c$ ). Os raios que incidam na face de entrada segundo ângulos superiores a  $\theta_{\max}$ , atingem a superfície interna da fibra segundo ângulos inferiores a  $\theta_c$ . Estes raios são apenas parcialmente reflectidos em cada incidência e rapidamente se extinguem. O *ângulo de aceitação* ( $\theta_{\max}$ ) é igual ao semi-ângulo do *cone de aceitação* (figura 3.6) da fibra.

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1 = \sin (\pi / 2 - \theta_t) \quad (3.9)$$

Logo:

$$n_2 / n_1 = \cos \theta_t \quad (3.10)$$

ou

$$n_2 / n_1 = (1 - \sin^2 \theta_t)^{1/2} \quad (3.11)$$

Utilizando a lei de Snell e reordenando os vários termos obtém-se:

$$\sin \theta_{\max} = 1 / n_0 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (3.12)$$

Onde  $n_0$  é o índice de refração do ar que é aproximadamente um. A *abertura numérica (NA)*, é definida por  $\sin \theta_{\max} n_0$ , que é dado por:

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (3.13)$$

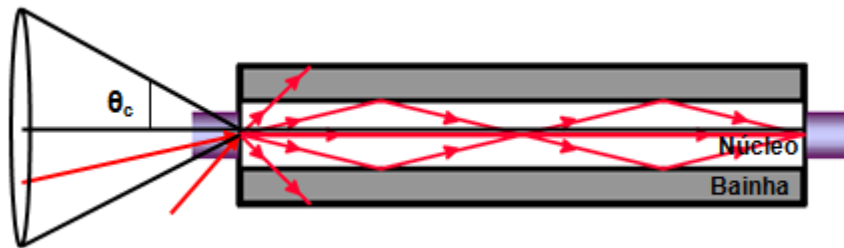


Figura 3.6 – Esquemática da radiação incidente transmitida pela fibra (ISCTE, s. d.).

Os feixes luminosos que encontrem a bainha com um pequeno ângulo são refractados do núcleo para a bainha, não transmitindo toda a luz e consequentemente a informação por ela transportada. Este problema poderia ser ultrapassado com o aumento abertura numérica que, no entanto, provocaria um aumento da *dispersão* dos feixes luminosos, visto que incidiriam com ângulos diferentes e, consequentemente, originariam comprimentos e tempos de percurso diferentes para atravessarem a fibra, diferentes (Amorim, 2002).

Numa fibra óptica o índice de refração depende da *dopagem* do vidro na fabricação da fibra bem como da dimensão do núcleo. O processo de fabrico inicia-se com a execução de um núcleo de grande pré-diâmetro, com perfil de índice refractivo cuidadosamente controlado. De seguida procede-se ao estiramento da fibra de modo a obter uma fibra óptica longa e fina. A dimensão do diâmetro do núcleo permite

distinguir, dois tipos de fibras mais comuns: fibra óptica multimodal (figura 3.7) e fibra óptica monomodal (figura 3.8) (Gowar, 1993).

As fibras multimodais possuem um núcleo de maior dimensão (maior do que  $10\text{ }\mu\text{m}$ ) o que permite a transmissão de centenas de *modos de propagação* dos feixes luminosos através do núcleo, em função do ângulo incidente na fibra. Existem dois tipos de fibra óptica multimodal (figura 3.7), a fibra com índice em degrau e a fibra com o índice de variação gradual (Moreira, 2005).

As fibras com índice em degrau possuem um núcleo composto por material homogêneo com um índice de refração constante e sempre superior ao da bainha (Bastos, 2004). Cada feixe luminoso, encontrando a bainha com um ângulo diferente, percorre o seu próprio caminho, diverso dos restantes feixes, o que significa que, cada um deles demora o seu tempo a percorrer a fibra óptica, o que dá origem à *dispersão intermodal* (Moreira, 2005) o que limita a frequência do sinal de entrada, determinando a taxa máxima com que a informação pode ser transmitida (Hecht, 1987).

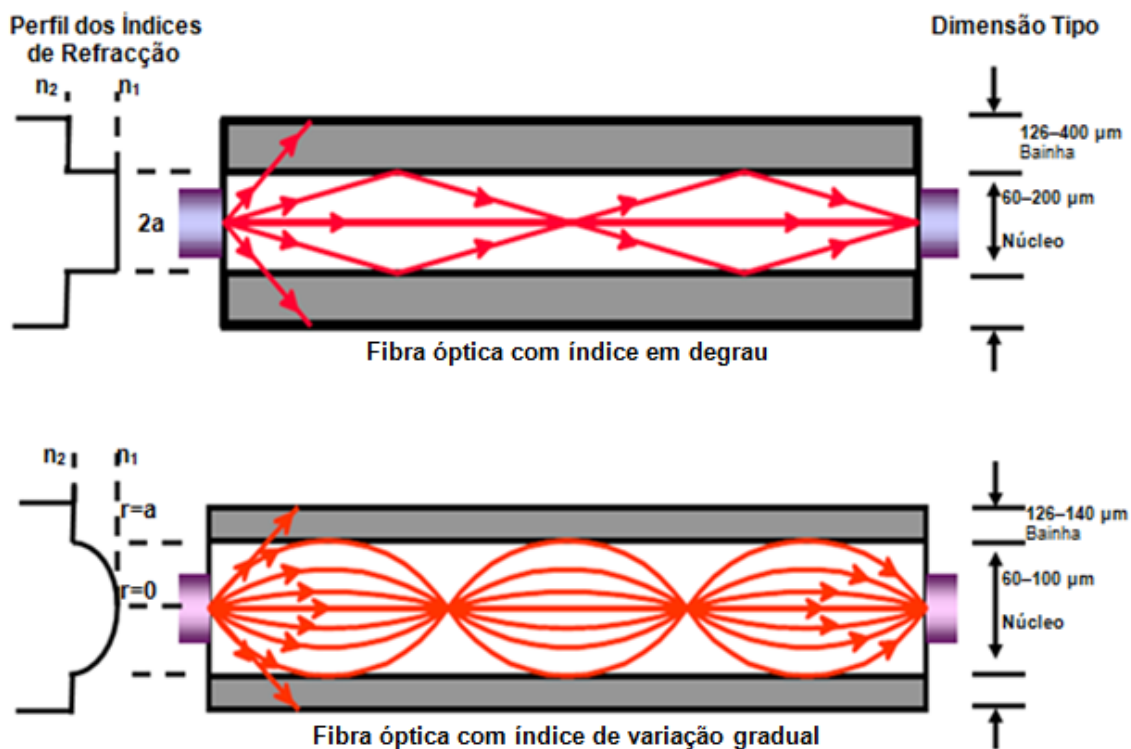


Figura 3.7 - Representação Esquemática das Fibras Multimodais e Propagação dos Respetivos Feixes Luminosos (adaptado de Moreira, 2005).

As fibras com índice de variação gradual possuem um núcleo com índices de refração variáveis, sendo mais elevado no centro. Esta variação é obtida através de

uma dopagem do núcleo com doses diferentes (Bastos, 2004). Na prática, esta dopagem faz com que os feixes percorram caminhos diferentes com velocidades diferentes variando parabolicamente quando se aproximam da bainha, não reflectindo bruscamente, de que resulta num percurso com curvas suaves. São fibras mais complexas mas que apresentam uma menor dispersão pois o baixo ângulo dos feixes faz com que este passe mais pela periferia do núcleo do que pelo centro (Hecht, 1987). Apresentam uma atenuação menor de 1dB/km e uma maior capacidade de transmissão de dados relativamente às fibras com índice em degrau (Bastos, 2004).

Nas fibras ópticas monomodais (figura 3.8) o diâmetro do núcleo é muito pequeno (8 a 12  $\mu\text{m}$ ), permitindo a propagação de um único feixe luminoso, paralelamente ao eixo central, resolvendo assim o problema da dispersão intermodal. Estas fibras possuem um índice de refacção no núcleo uniforme, sendo dispositivos de condução de uma onda de baixa perda, adequada, por isso, para aplicações que envolvam grandes distâncias (Moreira, 2005). O diâmetro da fibra é cerca de dez vezes menor do que o comprimento de onda de propagação do feixe luminoso, o que impede a sua modelação através da geometria óptica. Estas fibras devem ser analisadas como estruturas electromagnéticas através da solução das *equações de Maxwell*<sup>15</sup> (Hecht, 1987).

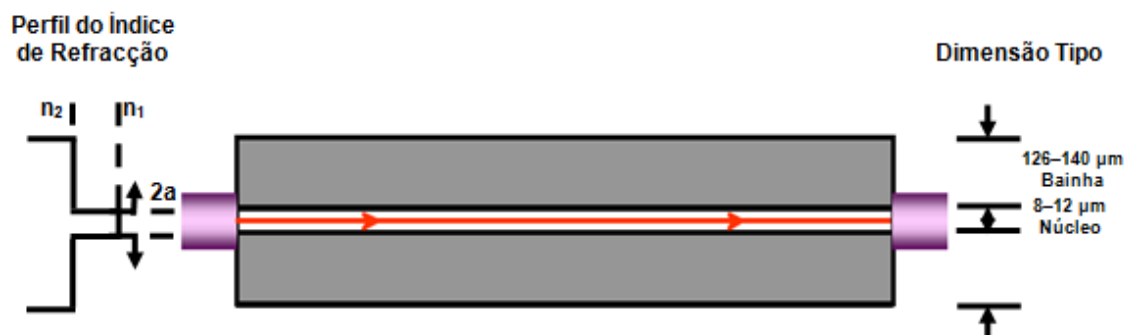


Figura 3.8 – Representação Esquemática de uma Fibra Monomodal e da Propagação do Feixe Luminoso (adaptado de Moreira, 2005).

Existem várias vantagens na utilização das fibras multimodais, relativamente às fibras monomodais, sendo a mais importante a maior facilidade em incidir a potência óptica na fibra, que advém da sua maior abertura numérica, sendo possível a propagação de mais que uma onda simultaneamente (Lima, 2002). A principal desvantagem é a

<sup>15</sup> A apresentação deste tipo de equações excede, pela sua natureza, o âmbito do presente trabalho.

ocorrência de dispersão intermodal, pois, como se referiu, cada modo viaja pela fibra com velocidades ligeiramente diferentes, o que significa que os modos que viajam na fibra chegam em instantes ligeiramente diferentes ao extremo de recepção da fibra. Este efeito, (dispersão intermodal), pode ser atenuado usando um perfil de índice gradual no núcleo, o que lhes permite terem uma maior largura de banda (com maior capacidade de transmissão) que as fibras de índice em degrau (ISCTE, s. d.).

Existem propriedades associadas às fibras ópticas que são bastante prejudiciais ao funcionamento sistemas de comunicações, nomeadamente a atenuação e a dispersão (Costa, s. d.).

A atenuação (também designada por perda) é um dos parâmetros mais importantes pois determina, em grande medida, a distância máxima entre o emissor e o receptor pois faz com que haja perdas no sinal transmitido, prejudicando o alcance do feixe luminoso. As suas causas são as seguintes (ISCTE, s. d.):

- 1- *Absorção* intrínseca devida aos próprios átomos do material da fibra (absorção na região dos infravermelhos e ultravioletas) e extrínseca devida a impurezas no vidro;
- 2- *Dispersão de Rayleigh*<sup>16</sup> devida a irregularidades a nível microscópico na densidade do material o que origina variações no índice de refração;
- 3 - Perdas radioactivas devidas a deformações e microcurvas.

A dispersão é responsável basicamente por causar uma distorção e *alargamento* dos impulsos transmitidos. A distorção vai causar um alargamento dos sinais ópticos à medida que se propagam ao longo da fibra. Se os sinais viajarem através de grandes distâncias é possível que interfiram com os seus vizinhos, podendo provocar distorções que se traduzem em erros na recepção. Assim, a dispersão determina o número de bits de informação que se podem transmitir num dado período de tempo (Costa, s. d.). O alargamento podendo ser intermodal ou intramodal, tem como consequência o aparecimento da *interferência inter-simbólica* que vai determinar o *ritmo binário* máximo que a fibra suporta (ISCTE, s. d.).

A *dispersão intramodal* resulta do facto de diferentes comprimentos de onda de um modo de propagação apresentarem diferentes velocidades de propagação na fibra

---

<sup>16</sup> Rayleigh (1842 – 1919) - Lord Rayleigh trabalhou na teoria de ondas, tornando-se Professor de física em Cambridge e foi vencedor do prémio Nobel pela descoberta do gás Árgon.

óptica. Resulta da contribuição da dispersão do material (devido à variação do índice de refração com o comprimento de onda) e da dispersão do guia (numa fibra monomodal apenas 80% da potência óptica está confinada no núcleo, propagando-se os restantes 20% na bainha, originando o alargamento do impulso dependendo da diferença de índices do perfil do índice de refração e do raio do núcleo da fibra) (Costa, s. d.).

Segundo Moreira, 2005, no que se refere à transmissão de dados entre o emissor e o receptor, a fibra óptica apresenta várias vantagens sobre os sistemas tradicionais (cobre), tais como:

- Baixa perda na transmissão de sinal e grande *largura de banda*: as fibras ópticas têm perdas de transmissão menores e larguras de banda maiores que os fios de cobre, o que significa que os sistemas de cabo de fibras ópticas podem percorrer grandes distâncias, diminuindo o número de fios e o número de repetidores necessários para estes domínios; esta redução de equipamento e de componentes diminui o custo do sistema e a sua complexidade;
- Tamanho e peso reduzidos: o baixo peso e as reduzidas dimensões (espessura de um cabelo) das fibras oferecem uma clara vantagem face aos pesados, e “espaçosos” cabos de fios nas condutas de cidades densamente povoadas; esta questão também é particularmente importante nos aviões, nos satélites e nos navios, onde cabos pequenos e leves são claramente vantajosos, e em aplicações militares, em que são necessárias grandes quantidades de cabos;
- Imunidade às interferências electromagnéticas: um aspecto particularmente importante das fibras ópticas diz respeito à sua *natureza dieléctrica*; esta característica permite guias de onda ópticas imunes a esse tipo de interferências;
- Isolamento eléctrico: o facto de as fibras ópticas serem construídas em vidro, que é um isolante eléctrico; também as torna particularmente atractivas em meios de risco, pois as fibras não originam arcos nem faíscas;
- Segurança do sinal: ao usar uma fibra óptica, o grau de segurança de dados é grande, pois o sinal óptico está bem confinado dentro da guia-de-onda (com as eventuais *emanações* a serem absorvidas pelo revestimento opaco da fibra), o que torna as fibras atractivas em aplicações em que a segurança e confidencialidade da informação seja importante, como em redes bancárias, de computadores ou de sistemas militares, por exemplo;

- Abundância de matéria-prima: a principal matéria-prima é o vidro, que é feito a partir da areia, abundante e barata; o principal factor de encarecimento da fibra é o processo necessário para obter vidro de um elevado grau de pureza;
- são flexíveis: podendo por isso ser enroladas em torno de carretéis.





## 4. Sensores de Fibra Óptica

Ao longo das últimas décadas têm havido grandes desenvolvimentos na optoelectrónica<sup>17</sup> e na indústria das comunicações através de fibra óptica. No desenvolvimento das fibras ópticas várias pesquisas têm sido efectuadas, visando nomeadamente a sua utilização em sistemas de medição (sensores de fibra óptica) (Ribeiro, 1996).

O desempenho das fibras ópticas no domínio das telecomunicações conduziu simultaneamente ao desenvolvimento de estudos no domínio da investigação com reflexos na indústria e, em consequência, à melhoria das suas características e ao aumento exponencial da quantidade produzida. A esse aumento correspondeu uma diminuição significativa dos custos (Yu, 2002).

A diminuição drástica dos custos, associada a características intrínsecas das fibras ópticas, tais como a imunidade às interferências electromagnéticas (EMI), a resistência a altas temperaturas, a elevada sensibilidade e a robustez em relação ao meio envolvente impulsionou o fabrico de sensores de fibra óptica na perspectiva da substituição dos sensores tradicionais, designadamente para a medição de temperaturas, de deformações, de deslocamentos, de pressões, de acelerações, etc. (Gholamzadeh e Nabbovatia, 2008).

### 4.1. Estado da Arte

Actualmente, a tecnologia dos sensores de fibra óptica oferece a possibilidade de, na observação de obras geotécnicas, medir diversos parâmetros tais como deslocamentos, deformações, pressões, temperaturas, etc., inclusive em locais remotos. As vantagens dos sensores de fibra óptica em contraste com os sensores convencionais torna-os mais populares em diferentes aplicações, sendo considerados como um componente chave na melhoria de processos industriais, em sistemas de controlo de qualidade, no apoio a diagnósticos do foro médico, e ainda para prevenir e controlar anomalias, o que torna a tecnologia óptica, que ainda está na sua primeira

---

<sup>17</sup> Optoelectrónica – é a área científica que constitui o elo de união entre os sistemas ópticos e os sistemas electrónicos. Os componentes optoelectrónicos são aqueles cujo funcionamento está directamente relacionado com a propagação da luz.

infância, um domínio que oferece interessantes perspectivas (Gholamzadeh e Nabbovatia, 2008).

A construção e manutenção das infra-estruturas civis representam, na maior parte dos países europeus, entre 10% e 20% do investimento público. Nos países mais desenvolvidos, nos quais as infra-estruturas de base estão quase totalmente construídas, assistiu-se, especialmente na última década, a uma transferência sucessiva dos investimentos na construção de novas infra-estruturas para investimentos na manutenção e ampliação da vida das estruturas já existentes. A título de exemplo, na área de transportes, com excepção das linhas do comboio de alta velocidade, a maior parte das redes, incluindo as rodovias e ferrovias, estão concluídas e em serviço. No entanto, o aumento de passageiros e de mercadorias que circulam no continente europeu, amplificada pela livre circulação política introduzida pela União Europeia, tem vindo a exercer sobre as infra-estruturas um sobre esforço que tem conduzido a degradações mais rápidas do que as previstas à data da construção.

Em muitas pontes e túneis construídos há algumas dezenas de anos tem surgido a necessidade de reabilitação colocando-se, em muitos casos, a opção de promover uma extensão da sua vida útil em prazos que ultrapassam os previstos originalmente. Além dos custos directos associados a estas intervenções, a ruptura com o uso normal das estruturas provoca transtornos adicionais, incluindo os engarrafamentos e os acidentes que transporta mais custos ocultos. As autoridades de gestão das infra-estruturas civis enfrentam o desafio de manter a rede de transportes em estado satisfatório e com pouca perturbação à sua utilização normal utilizando um orçamento limitado. Esta tarefa é muito mais complexa do que a da construção de novas estruturas. Estruturas de vigilância, são certamente uma das mais poderosas ferramentas de gestão e, portanto, ganha importância na comunidade da engenharia civil (Inaudi, 2005).

Nos últimos anos, os sensores de fibra óptica fizeram uma lenta mas significativa entrada no domínio dos sensores. Salienta-se que, após uma fase inicial caracterizada por uma certa euforia, quando parecia que os sensores de fibra óptica estavam na iminência de invadir o mundo da instrumentação, consta-se agora que esta tecnologia deve ser usada criteriosamente na sequência da análise comparativa do respectivo desempenho com o desempenho dos sensores convencionais de comprovada eficácia. O valor adicional dos sensores de fibra óptica pode fundamentar-se numa melhoria da qualidade das medições, numa maior fiabilidade, na possibilidade de

substituição das medições manuais que necessitam de um operador, na maior facilidade de recolha automática, numa mais fácil instalação e manutenção ou ainda num custo menor a longo prazo. Os primeiros sucessos de aplicações industriais de sensores de fibra óptica em estruturas de engenharia civil demonstram que esta tecnologia já está suficientemente madura para um uso rotineiro e que pode, em muitos casos, competir com os sensores convencionais (Inaudi, 2005).

Em Portugal, ainda se assiste a algumas dificuldades na implementação destes sensores, o que se atribui, entre outras possíveis razões, à familiarização fundamentada no respectivo desempenho ao longo de muitos anos, dos sensores convencionais. Apesar disso, foram já instalados sensores de fibra óptica tais como a Ponte D. Luís I, no Porto, a Ponte Vila Fria, em Felgueiras, de alvenaria, a Ponte Pedonal Circular em Aveiro, a Torre T3001 da “Galp Energia”, em Matosinhos, o túnel do Rossio, em Lisboa, que está também instrumentado com sensores de fibra óptica para avaliação, a longo prazo e por medição à distância, de convergências em determinadas secções (Fibersensing, s. d.).

## **4.2. Noção de um Sensor de Fibra Óptica**

As tecnologias associadas ao fabrico e às aplicações das fibras ópticas têm progredido, como tem vindo a ser referido, muito rapidamente nos últimos anos.

Se, no âmbito da transmissão de sinais, as perturbações exteriores devem ser, tanto quanto possível, minimizadas, no que se refere aos sensores de fibra óptica a resposta às acções exteriores é deliberadamente reforçada, de modo que a modificação resultante nas características da radiação óptica possa ser utilizada como uma medida dessa acção externa (Gholamzadeh e Nabovatia, 2008).

Considere-se um conjunto de experiências simples efectuadas com uma fibra óptica com um diâmetro com alguma dimensão. Imagine-se essa fibra estendida sobre uma estrutura, com um espelho colocado numa das suas extremidades. Ao observar o espelho, a olho nu, através fibra, se não existir qualquer perturbação no ambiente envolvente, o espelho irá reflectir nitidamente o olho do observador. Mas, se registarem perturbações nesse meio, a observação será:

1. desfocada, se o meio ambiente tiver sofrido uma aumento de temperatura;
2. apenas se observará parte do espelho se a fibra tiver sido flectida;

3. destorcida, se a fibra tiver sido sujeita a uma tensão de tracção.

No primeiro caso, o aumento da temperatura provocou uma alteração na estrutura molecular do meio, causando uma perturbação na observação.

No segundo caso, devido à flexão, a fibra apresenta uma curvatura que impede, parcialmente, a observação.

No terceiro caso o esforço de tracção, causa uma diminuição da secção da fibra, provocando obviamente um estreitamento do canal de observação.

A “transposição” desta experiência simples para o caso de um sensor instalado numa obra geotécnica, significa que as modificações causadas no meio envolvente por alterações de grandezas físicas, poderão ser observadas e registadas em sensores de fibra óptica. Associando, numa mesma obra geotécnica, um conjunto de sensores susceptíveis de reagir a alterações do meio envolvente causadas por alterações registadas em diferentes tipos de grandezas físicas pode materializar-se um sistema de observação sofisticado capaz de fornecer informações sobre a evolução dessas grandezas e, em particular, sobre eventuais anomalias que possam pôr em risco a segurança dessas obras.

Para além da possibilidade de actuarem como sensores, mediante a caracterização das modificações da radiação óptica em resultado das alterações físicas, químicas ou biológicas registadas no meio envolvente, as fibras ópticas podem também ser utilizadas para, aproveitando as suas características no domínio da transmissão de sinais, assegurarem a comunicação entre os dispositivos que compõem o sistema.

Na medição de parâmetros físicos a fibra actua como um modelador e conversor de grandezas físicas tais como a temperatura, deformação, deslocamento, pressão e aceleração dos parâmetros correspondentes da radiação óptica. De facto, a radiação óptica é caracterizada por um conjunto de parâmetros independentes, a intensidade, a frequência, a fase e a polarização, todos potencialmente sensíveis às grandezas físicas. Assim, se uma grandeza física produzir alterações das propriedades físicas da fibra óptica, as características da radiação que se propaga na fibra serão modificadas possibilitando, através de uma “leitura” adequada dessas alterações, a determinação da variação dessa grandeza física.

Para além das vantagens das fibras ópticas referidas anteriormente, os sensores de fibra óptica apresentam ainda outras relativamente aos sensores tradicionais, nomeadamente a grande fiabilidade das leituras em tempo real, uma grande

resistência à corrosão, a passividade eléctrica (o material da fibra é um material dieléctrico), o baixo consumo de potência eléctrica, a resistência a altas temperaturas, e a possibilidade de *multiplexagem* óptica e ainda uma relação custo/qualidade que tem vindo a diminuir ao longo do tempo (Ribeiro, 1996).

### 4.3. Classificação de Sensores de Fibra Óptica

À grande variedade de sensores de fibra óptica corresponde também diferentes possibilidades em termos da respectiva classificação. De entre essas possibilidades adoptaram-se as seguintes (Gholamzadeh e Nabovati, 2008):

- i. Classificação com base na medição, distinguindo sensores extrínsecos (a medição realiza-se numa região fora da fibra óptica, servindo a fibra essencialmente como um meio de transmissão) e sensores intrínsecos (a própria fibra é o sensor actuante, no qual as grandezas físicas alteram uma ou mais propriedades ópticas da radiação);
- ii. Classificação com base na modulação, distinguindo sensores de intensidade do feixe luminoso injectado numa fibra óptica e na perturbação nele induzida, sensores baseados no *conteúdo espectral*, dependendo da modulação da luz através do comprimento de onda devido a alteração de grandezas físicas, sensores baseados na polarização através da alteração do índice de refacção da fibra devido alterações de grandezas físicas; e, sensores baseados na fase devido a alterações da fase do feixe luminoso por alterações de grandezas físicas;
- iii. Classificação com base na localização dos pontos de medida, distinguindo sensores pontuais (nos quais a medição é feita sobre um segmento específico da fibra óptica), sensores multiplexados (nos quais a medição é efectuada em múltiplos pontos ao longo da fibra) e sensores distribuídos (nos quais é possível efectuar medições em qualquer ponto ao longo de uma única fibra) (Carome *et al.*, 1986);
- iv. Classificação com base na tipologia das grandezas medidas a que correspondem, sensores físicos (para medição de grandezas físicas), sensores químicos (para medição de grandezas químicas) e sensores biomédicos (nomeadamente cateteres ou endoscópios) (Culshaw e Dakin, s. d.).

Apresentam-se seguidamente alguns tipos de sensores.

#### **4.3.1. Com base na medição**

Nos sensores intrínsecos, as grandezas que se pretendem medir alteram as próprias propriedades da fibra óptica modelando o feixe luminoso, podendo a modulação ser “lida” em termos de intensidade, da fase ou da polarização. O sensor de fibra óptica pode detectar variações de quaisquer grandezas físicas, devendo o sensor ser concebido para reagir apenas às alterações da grandeza que se pretende medir.

Tal como referido anteriormente, é considerado outro tipo de sensor com base na medição, o sensor extrínseco. O sensor extrínseco é um sensor convencional que utiliza uma fibra óptica habitualmente multimodal, para transmitir feixes luminosos modulados para um receptor remoto, onde será tratada a informação (Bahareh, 2008).

No caso de haver necessidade de, numa obra geotécnica equipada com sensores convencionais e em que a informação é transmitida através de cabos de cobre, substituir estes cabos por fibras ópticas (por exemplo, devido ao ambiente existente poder ser de grande ruído electromagnético), essa substituição pode ser efectuada com relativa facilidade com a vantagem inerente das fibras serem imunes aquele ruído. A saída dos sensores convencionais não está preparada para transmitir a informação para a fibra óptica, sendo por isso necessária uma conversão prévia.

Se já existe um sensor que transforma a grandeza física em observação num sinal eléctrico é suficiente através de um transdutor fazer a conversão desse sinal numa grandeza luminosa.

A transmissão dos sinais recolhidos dos sensores convencionais pode efectuar-se das seguintes formas:

1 – Analogicamente, podendo afirmar-se empiricamente que a um maior valor do sinal eléctrico corresponderá um maior brilho a ser injectado na fibra, o que somado a grande largura de banda disponível característica das fibras ópticas tem a vantagem de disponibilizar a informação de todos os valores dos sensores on-line;

2 – Digitalmente, processo em que há amplitude do valor eléctrico em presença é atribuído, através de um conversor digital um valor numérico (binário). Este método aliado a uma transmissão em tempo partilhado e com o auxílio de controladores permite obter a informação não de uma forma total mas que será satisfatória e certamente mais económica.

Segundo a lei de Ohm sabe-se que:

$$V = R \times I \quad (4.1)$$

$$P = V \times I \quad (4.2)$$

$$P = R \times I^2 \quad (4.3)$$

Como a *tensão* (V) é uma constante do circuito e a *resistência* (R) varia proporcionalmente com a variação da grandeza física a medir, a *intensidade* (I) varia em função da variação da grandeza. A intensidade, ao variar, interfere com a potência da luz, podendo-se assim injectar na fibra um feixe luminoso com variação de potência em acordo com a variação da grandeza física.

Outro método consiste em colocar um conversor analógico-digital (A/D) (figura 4.2), tendo de se ter em atenção que, ao contrário do método anterior, que dá todos os níveis de informação, a digitalização do sinal implicará alguma perda de informação, atendendo a que método pode fornecer 256 níveis de informação por cada *Byte* digitalizado.

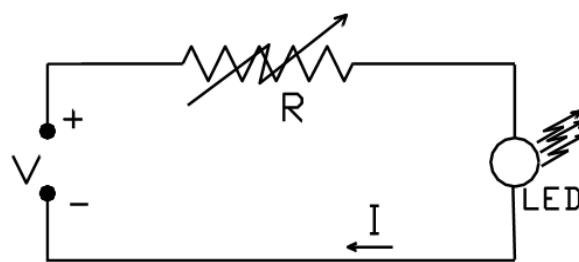


Figura 4.1 - Circuito analógico.

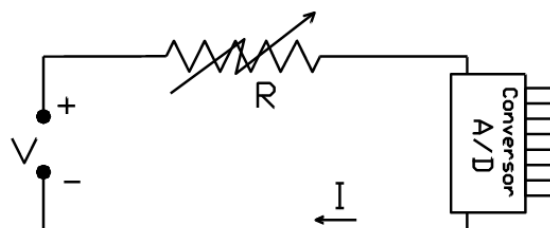


Figura 4.2 - Circuito digital.

A conjugação destes dois métodos possibilita a construção de um modelo híbrido a que corresponde um sistema visando a optimização da relação custo/benefício.

Um exemplo deste tipo de sensor é um termómetro de resistência de platina. A corrente eléctrica que o atravessa sofre uma alteração provocada pela variação da

resistência que é sensível à variação de temperatura, sendo esta alteração no sinal eléctrico convertida numa alteração da intensidade da luz a ser injectada na fibra óptica.

#### 4.3.2. Com base na modulação

Os sensores de fibra óptica baseados na modulação são sensores intrínsecos, sendo que as medições de variações de grandezas físicas se efectuam através da intensidade, conteúdo espectral, polarização, fase ou outros métodos. O feixe de luz a injectar mantém as mesmas características ao longo do tempo, sendo as variações que ocorrem no feixe devidas a alterações de grandezas físicas, “lidas” por um processador óptico ou electrónico.

Nos itens seguintes apresentam-se, para cada classe as subclasses mais significativas do ponto de vista dos objectivos do presente trabalho.

##### 4.3.2.1. Sensores de fibra óptica baseados na intensidade

Nalguns casos, os sensores de fibra óptica baseiam-se na intensidade do feixe luminoso injectado numa fibra e na perturbação nele induzida por uma alteração de uma grandeza física. A “leitura” da alteração pode ser efectuada de diversas formas.

###### *i. Medição com base na abertura numérica*

A figura 4.3 exemplifica um sensor de fibra óptica com medição baseada na abertura numérica, que consiste em duas fibras ópticas, colocadas no mesmo alinhamento e próximas uma da outra.

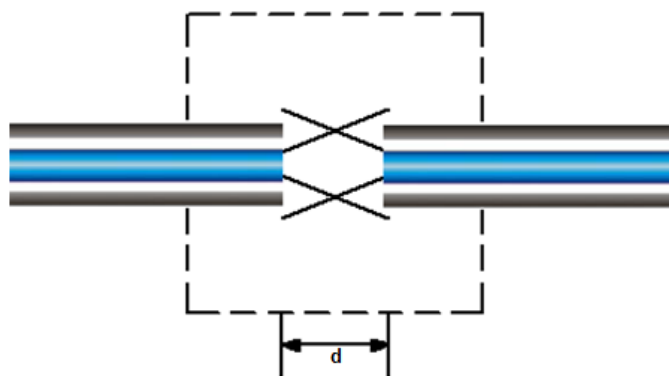


Figura 4.3 - Sensores de fibra óptica baseada na intensidade e abertura numérica (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

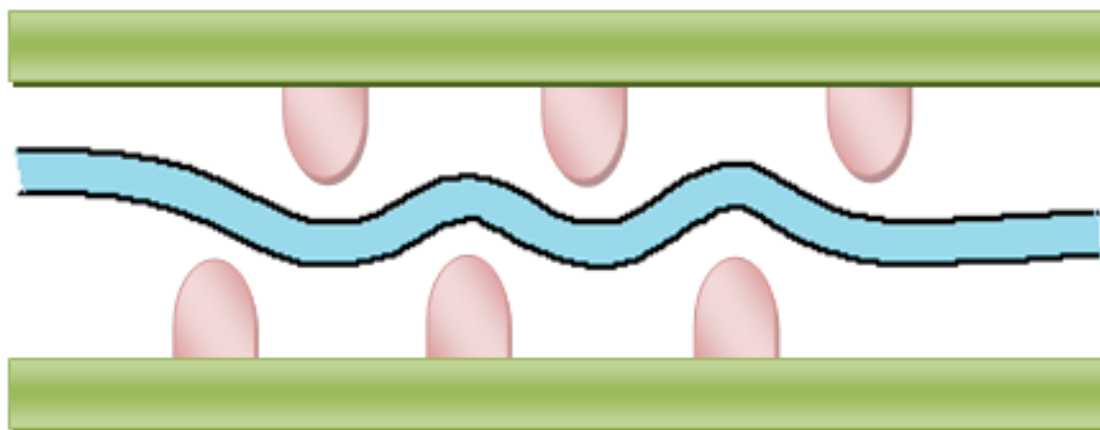


A luz injectada na primeira fibra expande-se na zona de saída num cone de luz (Asawa e Yao, 1983 e Lagokos *et al.*, 1981). A quantidade de luz captada pela segunda fibra óptica depende do seu ângulo de aceitação e da distância entre as duas fibras. Quando a distância  $d$  é modulada, isso traduz-se numa modulação da intensidade da luz captada, permitindo assim determinar variações na distância  $d$ .

## ii. Medição com base na *microdobragem*

Quando o raio de curvatura de uma fibra óptica excede o ângulo crítico necessário para confinar o feixe luminoso ao núcleo, há uma dispersão do feixe para a bainha. Uma microdobragem da fibra pode causar esse efeito figura.

Foi desenvolvida uma série de sensores baseados em microdobragem (figura 4.4), permitindo localizar as zonas onde ocorrem alterações que provocaram essa dobra. A intensidade de saída da luz é directamente proporcional à magnitude da microdobragem, ou seja, detectando variações dessa intensidade é possível detectar, quantificar e localizar deformações que causem micro flexões na fibra (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).



**Figura 4.4 - Sensor baseado na microdobragem (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).**

Para além da medição de deformações, é possível medir também tensões, pressões ou forças que estejam associadas a esta microdobragem utilizando o mesmo sensor de fibra óptica. Este sensor tem como desvantagem uma baixa exactidão e como vantagem o seu baixo custo e a possibilidade de ser combinado com técnicas de reflectometria óptica podendo cobrir vastas áreas (Yu, 2002).

### iii. Medição com base na reflexão

Neste tipo de sensores, a luz emitida pela fonte (emissor) viaja numa fibra óptica da esquerda para a direita, sai na extremidade da fibra e incide num reflector susceptível de movimento (afastamento ou aproximação) na direcção normal á fibra. Na situação de referência a maior parte da luz regressa à fibra sendo, no detector medida uma elevada intensidade do sinal. Quando o reflector se afasta a quantidade de luz que é enviada para o detector é menor, o que corresponde a um sinal mais fraco e quando se aproxima há um aumento da intensidade, com um correspondente aumento do sinal no detector (figura 4.5).

De acordo com o processo descrito, a distância entre a extremidade da fibra e o reflector influencia a intensidade da luz que regressa ao detector, podendo esta relação ser utilizada para a medição de deslocamentos (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

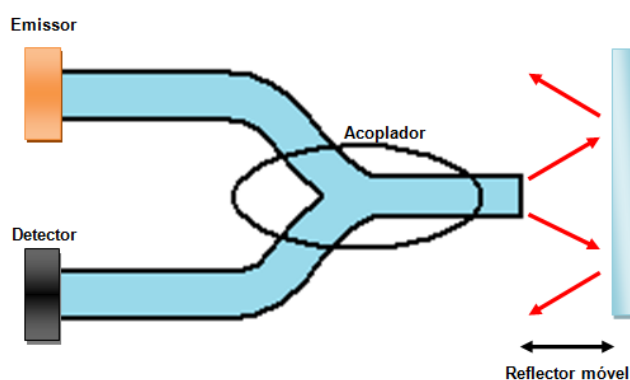


Figura 4.5 – Sensor de fibra óptica com base na reflexão (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

### iv. Medição com base no acoplamento de luz evanescente

Uma luz evanescente é uma porção da luz que se propaga para fora do núcleo, estendendo-se para a região da bainha. Este tipo de propagação tem sido usado para fabricar uma componente de fibra óptica muito utilizada, um acoplador direccionado (Gholamzadeh e Nabovati, 2008). O princípio de funcionamento deste tipo de sensor é o seguinte: a luz é emitida a partir do extremo de uma das fibras (emissor), sendo a luz evanescente recebida no detector colocado na outra fibra figura 4.6. A intensidade de acoplamento das duas fibras ópticas é função da distância entre os dois núcleos

sendo que, quanto menor for, maior será o acoplamento. O coeficiente de acoplamento é directamente proporcional à distância entre as duas fibras.

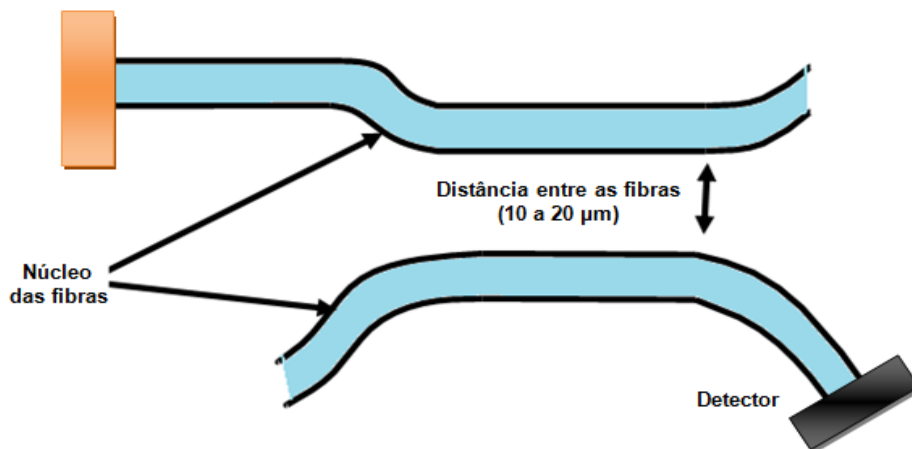


Figura 4.6 - Sensor de fibra óptica acoplamento de luz evanescente (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

No que se refere às várias subclasses de sensores de fibra óptica baseados na intensidade salienta-se que existem uma série de limitações impostas pelas perdas no sistema que não estão relacionadas com as grandezas que se pretendem medir. Os potenciais erros na fonte incluem perdas devidas a conexões e empalmes, perdas associadas a macro e microdobragens, perdas mecânicas e perdas devidas a fluência, e desalinhamento das fontes e dos detectores com as extremidades da fibra nas respectivas zonas.

Para contornar estes problemas muitos destes sensores utilizam um duplo comprimento de onda, para calibrar erros devido a variações de intensidade indesejadas ou são utilizados sensores que não são afectados pelos erros induzidos pelas variações de intensidades na região a monitorizar. Os sensores de fibra óptica que possuem esta característica são os sensores de fibra óptica espectrais, tratados a seguir.

#### 4.3.2.2. Sensores de fibra óptica baseados no conteúdo espectral

Os sensores de fibra óptica baseados no conteúdo espectral dependem da modulação do feixe luminoso devida às variações das grandezas físicas. Este tipo de sensores baseia-se em sistemas de radiação de *corpo negro*, de absorção, de *fluorescência*, e de redes de dispersão.

### i. Medição com base na radiação de *corpo negro*

O sensor de fibra óptica baseado no conteúdo espectral através da radiação de um corpo negro é um dos tipos mais simples de sensores que existe. Consiste num corpo negro com uma cavidade onde é introduzida a fibra óptica (figura 4.7). Quando a temperatura do corpo aumenta, em função da temperatura ambiente (o corpo negro funciona então como um sensor de temperatura), emite um brilho actuando, por isso como uma fonte luminosa, o que permite a medição de temperaturas (Yu, 2002). A luz percorre a fibra óptica até ao detector onde é analisada comparando com a luz proveniente do emissor.

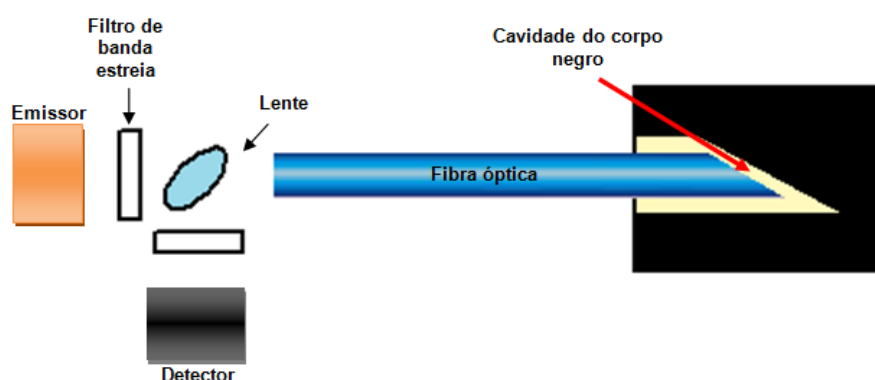


Figura 4.7 – Sensor de fibra óptica utilizando um corpo negro (adaptado de Yu, 2002).

O desempenho e a exactidão deste sensor é melhor a altas temperaturas, descendo a sua fiabilidade para temperaturas inferiores a 200°C.

### ii. Medição com base na absorção de cristais semicondutores

Este método utiliza a característica típica de certos cristais semicondutores, tais como o Arsenieto de Gálio (GaAs), cujo limite de absorção/transmissão de luz varia com a temperatura. Neste caso, o comprimento da onda reflectida aumenta quando há um aumento da temperatura. Sendo assim, a partir da determinação deste limite de transição pode-se obter o valor da temperatura no elemento sensor (Bortoni *et al.*, 2007). Mais especificamente, o sensor consiste numa fibra óptica com um cristal semiconductor (GaAs) e um espelho dieléctrico colocado na sua extremidade (figura 4.8). A luz atravessa o cristal, é reflectida pelo espelho e regressa à fibra em direcção ao detector.



Figura 4.8 - Estrutura típica de um sensor óptico de temperatura, baseado na absorção de cristais semicondutores (adaptado de Bortoni *et al.*, 2007).

### iii. Medição com base na fluorescência

A fluorescência é a capacidade de uma substância emitir luz quando é exposta a radiações do tipo raios ultra violeta (UV), raios catódicos ou raios X. Durante a absorção das radiações electromagnética, as moléculas são elevadas a um estado electrónico excitado. A maioria das moléculas dissipa este excesso de energia na forma de calor pela colisão com outras moléculas. Mas algumas emitem parte deste excesso energético em luz, com um comprimento de onda diferente do correspondente à radiação absorvida. A luz emitida é proveniente de uma transição entre estados electrónicos, dando-se assim a fluorescência.

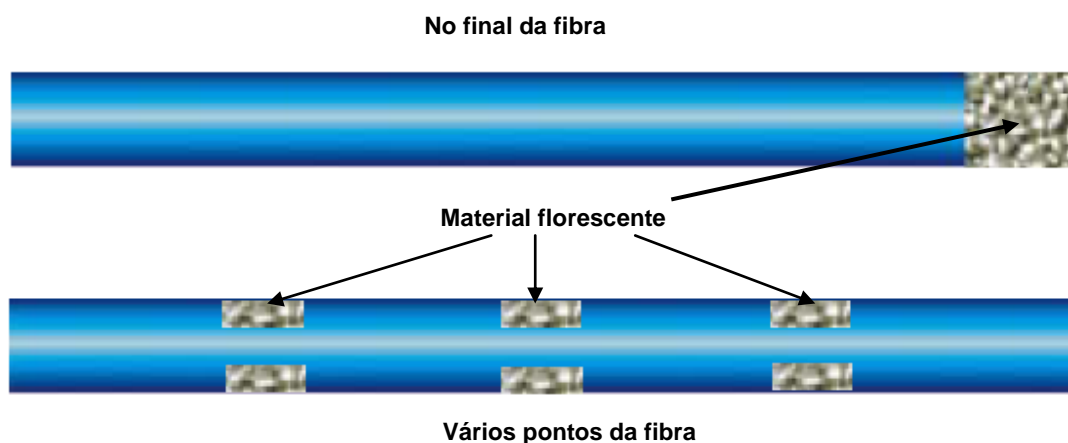


Figura 4.9 - Dois tipos de sensores de fibra óptica baseados na fluorescência mais utilizados (adaptado de Yu, 2002).

Os sensores de fibra óptica baseados no conteúdo espectral através da fluorescência permitem medir algumas grandezas físicas, tais como a temperatura e a humidade. Existem várias configurações para estes sensores. Na figura 4.9 observam-se as duas mais comuns, sendo uma configurada para medições apenas no final da fibra e outra para vários pontos da fibra, através da tecnologia de “*etchs*” secundários anexando material fluorescente ao longo da fibra óptica.

No caso do sensor de ponta a luz propaga-se para o extremo da fibra para uma sonda de material fluorescente. O sinal fluorescente resultante é capturado pela mesma fibra e direccionado para trás para um desmodulador de saída (detector). As fontes de luz podem ser pulsáveis e as sondas são feitas de forma a depender da taxa do decréscimo do tempo da luz pulsada.

É possível também utilizar as propriedades evanescentes da fibra óptica e em algumas regiões do revestimento colocar material fluorescente. Ao enviar um leve impulso para a fibra pode-se, através da análise dos resultados da fluorescência, efectuar uma série de medições mediante a divisão por multiplexagem. Também é possível introduzir material fluorescente no núcleo da fibra, embora esta abordagem cause em toda a fibra óptica actividade fluorescente. Através da utilização de multiplexagem por divisão de tempo, várias regiões da fibra podem ser utilizadas para fazer medições distribuídas ao longo de todo o comprimento da fibra.

#### iv. Medição com base em redes

Os sensores de fibra óptica baseados no espectro utilizando redes de dispersão podem ser configurados para comprimentos de 1 a 10 mm, com sensibilidade semelhante aos extensómetros convencionais. Este tipo de sensores é fabricado através da colocação de redes de dispersão no núcleo de uma fibra óptica dopada com *Germânio*. Este processo pode ser efectuado de várias formas. Uma delas consiste no uso de dois feixes de raios laser de comprimento de onda curto de modo a causar uma interferência padrão na fibra óptica. Essa interferência traduz-se numa sucessão de franjas brilhantes e escuras que identificam os locais de alteração do índice de refacção da região do núcleo da fibra (Yu, 2002).

O tempo de exposição à acção dos feixes de raios laser para materializar estas redes varia de minutos a horas, dependendo da dopagem de Germânio (isto é da sua

concentração) na fibra, do comprimento de onda dos raios laser utilizados e do seu nível de poder óptico. Este assunto será retomado com maior pormenor mais adiante.

#### **4.3.2.3. Sensores de fibra óptica baseados na polarização**

Um raio de luz segundo uma dada direcção é constituído por um conjunto de ondas electromagnéticas vibrando sinusoidalmente nos planos que contêm aquela direcção. Em certas condições o raio de luz é constituído apenas por ondas que vibram num só plano. Diz-se então que o raio de luz está polarizada sendo aquele o plano de polarização (Fialho, 1969).

No caso da luz esse comportamento pode ser percebido com o uso de materiais polarizadores. O primeiro polarizador que a luz encontra permite a passagem apenas da radiação que vibra numa direcção particular. Se colocarmos um segundo filtro polarizador a seguir ao primeiro, e os planos de polarização dos dois filtros coincidirem, a luz atravessará os dois filtros, ficando polarizada nesse plano. Mas se os planos dos dois filtros forem perpendiculares, nenhuma parte da luz polarizada pelo primeiro filtro conseguirá passar através do segundo (não se conseguirá ver nenhuma imagem através dos filtros).

O índice refractivo da fibra óptica pode ser modificado através da aplicação de tensões ou extensões, sendo esta modificação chamada de *efeito de fotoelástico*. Além do mais, em muitos casos, a tensão ou extensão acontece em direcções diferentes, o que leva a que a modificação do índice de refração induzida seja também diferente. Assim, sob uma perturbação externa, como a tensão ou extensão, a fibra óptica trabalha como um retardador linear. Por isso, descobrindo a alteração da polarização, a perturbação externa que a motiva pode ser medida (Gholamzadeh e Nabovatia, 2008).

#### **4.3.2.4. Sensores de fibra óptica baseados na fase**

Um feixe de luz pode ser modelado como uma onda de oscilação de campos eléctricos e magnéticos. Quando dois ou mais feixes de luz se encontram no espaço, estes campos adicionam-se de acordo com o princípio da sobreposição. Ou seja, em cada ponto no espaço, os campos eléctricos e magnéticos resultantes da combinação de dois ou mais feixes de luz podem ser determinados através da soma dos vectores das áreas (figura 4.10) dos feixes considerados separadamente.

Se os feixes de luz são originários da mesma fonte, existe geralmente algum grau de correlação entre as frequências e as fases de oscilação. Num ponto do espaço a luz dos feixes pode estar continuamente em fase; neste caso, o campo combinado resultará sempre num máximo a que corresponderá um ponto brilhante. Num outro ponto a luz dos feixes pode estar continuamente fora de fase, de que resultará sempre um mínimo, a que corresponderá um ponto escuro.

Thomas Young<sup>18</sup> foi um dos primeiros cientistas a conceber um método para produzir padrões de *interferência*. A experiência realizada consistiu na projecção de um único e estreito feixe de luz que fez passar por duas fendas estreitas, com um determinado espaçamento. Os feixes de luz resultantes foram projectados numa tela, na qual os feixes de luz provenientes das duas fendas surgiram sob a forma de um padrão regular de bandas escuras e brilhantes. A experiência de Young revelou-se uma importante evidência para a natureza ondulatória da luz.

As fendas de Young podem ser usadas como *interferómetros* simples. Se o espaçamento entre as fendas é conhecido, o espaçamento dos máximos e mínimos pode ser utilizado para determinar o comprimento de onda da luz. Inversamente, se o comprimento de onda da luz é conhecido, o espaçamento das fendas pode ser determinado a partir da interferência dos padrões.

A luz emitida por qualquer fonte pode ser usada para obter modelos de interferência. Contudo, a luz branca geralmente é menos ajustada para produzir modelos de interferência claros, pois é uma mistura de um espectro cheio de cores, onde cada um tem espaçamento de interferência das franjas diferente. A luz de sódio está perto do *monocromático*, sendo assim mais conveniente para produzir modelos de interferência. A luz mais conveniente é a luz do raio laser, pois é quase monocromática. A interferência pode ser construtiva ou destrutiva.

Considerem-se duas ondas que estão em fase, com amplitudes  $A_1$  e  $A_2$ . Os seus picos máximos e mínimos enfileiram-se e a onda resultante terá amplitude  $A = A_1 + A_2$ , o que é conhecido como interferência construtiva.

Se as duas ondas estão  $\pi$  radianos desfasadas, os picos máximos de uma onda irão coincidir com os picos mínimos da outra, tendendo assim a anular-se. A amplitude

---

<sup>18</sup> - Tomas Young (1773 – 1829) - polímato inglês que deu contribuições notáveis para os campos da visão, luz, mecânica sólida, energia, fisiologia, linguagem, harmonia musical e Egiptologia.



resultante é  $A = |A_1 - A_2|$ . Se  $A_1 = A_2$ , o resultado da amplitude da onda combinada será nula, o que é conhecido como interferência destrutiva.

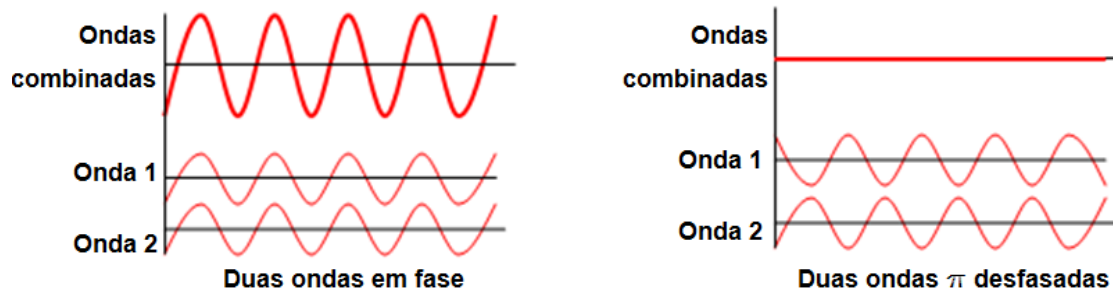


Figura 4.10 - Ondas de interferência construtiva e destrutiva.

Quando duas ondas sinusoidais se sobrepõem, o resultado depende da amplitude de frequência (ou comprimento de onda) e da fase das duas ondas. Se as duas ondas têm a mesma amplitude  $A$  e comprimento de onda, a onda combinada terá uma amplitude entre  $2A$  e  $0$ , dependendo se as ondas estão em fase ou desfasadas.

Na figura 4.11 pode-se observar um modelo de interferência (franjas). As bandas brilhantes são o resultado da interferência construtiva, enquanto as bandas escuras são o resultado da interferência destrutiva.



Figura 4.11 - Franjas (PASCAL, 1990).

A fase de um feixe luminoso pode ser modificada por variações de grandezas físicas, podendo este fenómeno ser utilizado para detectar essas variações. Como estes sensores não conseguem detectar fases ópticas directamente, a fase é convertida em

intensidade através de um interferómetro, como o de Mach-Zehnder<sup>19</sup>, o de Michelson<sup>20</sup>, o de Sagnac<sup>21</sup> ou o de Fabry<sup>22</sup>-Perot<sup>23</sup>.

Um interferómetro é um equipamento no qual os efeitos da interferência da luz (modificação ou destruição de um sinal no percurso entre o emissor e o receptor) são utilizados para medição de grandezas. São constituídos normalmente por uma fibra monomodal e aplicam-se para a medição da mudança da fase da luz num número de diferentes configurações. Estes sensores captam a interferência da luz em duas fibras ópticas idênticas, uma com o objectivo de servir como referência e a outra como sensor. Estes sensores são altamente sensíveis à variação da deformação. Uma excepção ao sensor interferométrico de dois ramos é o sensor de fibra única Fabry-Perot, onde a fibra é manipulada de forma a formar dois espelhos reflectores perpendiculares ao eixo da mesma (ANSARI, 1997).

#### *i. Medição com base no interferómetro de Michelson*

Em 1881, 78 anos após a experiência de Young, Michelson projectou e construiu um interferómetro utilizando um princípio semelhante, baseando-se na medição por comprimento de onda. Na figura 4.12 apresenta-se um esquema do interferómetro Michelson.

---

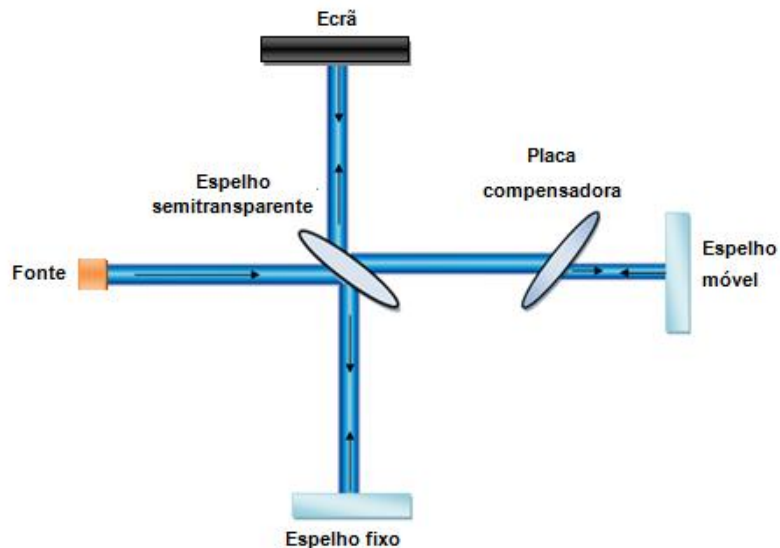
<sup>19</sup> Zehnder – físico que desenvolveu o interferómetro de Mach-Zehnder.

<sup>20</sup> Michelson (1852 - 1931) - físico americano conhecido pelo seu trabalho sobre a medição da velocidade da luz. Em 1907 recebeu o prémio Nobel de Física, tornando-se no primeiro americano a receber o prémio Nobel de ciências.

<sup>21</sup> Sagnac (1869-1928) - físico francês que emprestou o seu nome ao efeito de Sagnac, um fenómeno que está na base do princípio dos interferómetros e giroscópios.

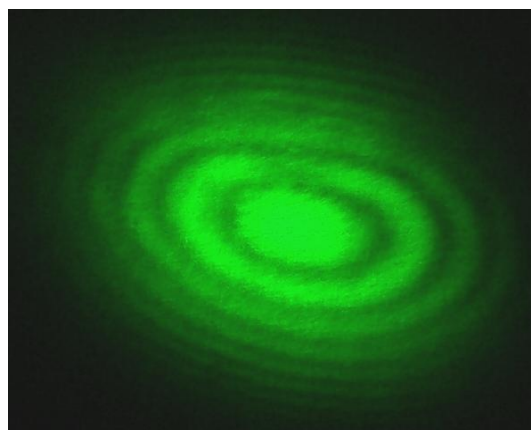
<sup>22</sup> Fabry – (1867 - 1945) - físico francês que descobriu uma explicação para o fenómeno da interferência de franjas. Juntamente com o seu colega Alfred Perot inventou o interferómetro Fabry-Perot.

<sup>23</sup> Perot (1863 – 1925) físico francês que, em conjunto com Charles Fabry, desenvolveu o interferómetro de Fabry-Perot.



**Figura 4.12 - Interferômetro de Michelson (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008).**

O feixe de luz do laser atinge o espelho semitransparente, que reflecte 50% da luz incidente e transmite outros 50%. O feixe incidente é, portanto, dividido em dois feixes; um feixe é transmitido para uma fibra de medição em direcção ao espelho móvel, o outro é reflectido para a fibra de referência, em direcção ao espelho fixo. Ambos os espelhos reflectem a luz directamente de volta em direcção ao espelho semitransparente (PASCAL, 1990) onde o feixe de luz, originalmente dividido, é recombinado, transportando consigo as interferências sofridas pelos feixes de luz, sendo projectadas para o ecrã de visualização (figura 4.13).



**Figura 4.13 – Modelo de interferência produzido com um interferômetro de Michelson (Wikipédia s. d.).**

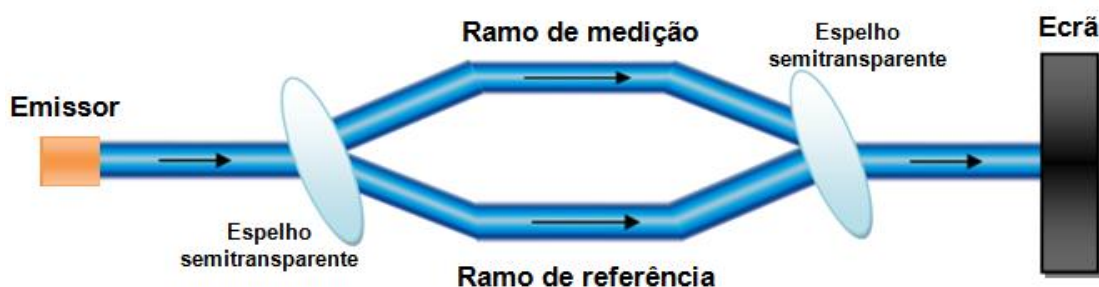
Uma vez que os dois feixes de luz que sofreram interferência foram divididos a partir do mesmo feixe inicial, estão inicialmente na fase. As suas fases relativas quando se

reúnem, após a separação, dependem da diferença do comprimento do caminho óptico no ponto de reencontro, e então eles interferem construtivamente ou destrutivamente dependendo do tamanho da diferença de caminho. Se os dois caminhos percorridos diferirem por um número inteiro de comprimento de onda (incluindo 0) ocorre uma interferência construtiva e um sinal forte no detector. Se eles diferirem por um número inteiro e meio (por exemplo 0,5, 1,5, 2,5...) ocorre uma interferência destrutiva e um sinal fraco.

O interferómetro de Michelson pode ser usado para medir comprimentos de onda com grande exactidão. Todos os outros interferómetros baseiam-se neste princípio, embora com diferentes métodos de determinação.

#### *ii. Medição com base no interferómetro de Mach-Zehnder*

O interferómetro Mach-Zehnder é constituído (figura 4.14) por dois ramos: o ramo de medição e o ramo de referência. A luz proveniente de uma fonte de luz é lançada numa fibra monomodal sendo dividida em dois feixes de igual intensidade através de um espelho semitransparente. Uma parte do feixe é enviado para o ramo de medição e a outra para o ramo de referência. Depois dos dois feixes passarem pelos dois ramos, são recombinados por um segundo acoplador. Assim, um sinal de interferência entre os dois feixes é então formado e projectado no ecrã de visualização (Yu, 2002).



**Figura 4.14 - Interferómetro Mach-Zehnder (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008).**

Existem algumas semelhanças entre os interferómetros de Michelson e de Mach-Zehnder. Em termos de semelhanças, o interferómetro de Michelson é frequentemente considerado como sendo uma cópia do interferómetro de Mach-Zehnder, e vice-versa.

Assim, a partir deste argumento pode-se estimar que a perda óptica das duas configurações é semelhante. Os resultados, naturalmente, têm a mesma forma que o Mach-Zehnder. Em termo das diferenças, o interferómetro de Michelson requer apenas um único acoplador. Como a luz passa através de ambos os ramos duas vezes, o desfasamento óptico por unidade de comprimento da fibra duplica. Assim, intrinsecamente o interferómetro de Michelson pode ter melhor sensibilidade (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

Do ponto de vista prático, a configuração física do interferómetro de Michelson, torna-o, para certas aplicações, mais fácil de compactar. Outra vantagem destes interferómetros em relação ao Mach-Zehnder é o facto de poder funcionar apenas com uma fibra óptica, sendo contudo necessário, um bom reflector. Além disso parte da luz que regressa para a fibra óptica é reintroduzida na fonte, podendo ser bastante perturbador para a fonte, sendo necessário um dispositivo apropriado para evitar este efeito.

### *iii. Medição com base no interferómetro de Sagnac*

O efeito de Sagnac é um efeito interferométrico que se obtém através de rotação, manifestando-se numa configuração chamada de anel de interferometria. Um feixe de luz é dividido, seguindo os dois feixes trajectórias com direcções opostas (figura 4.15). No regresso ao local de entrada, a luz sai do aparelho de tal modo que é obtida uma interferência padrão. A posição das franjas de interferência depende da velocidade angular da configuração (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

Normalmente, são utilizados vários espelhos, de modo a que os feixes de luz sigam uma trajectória triangular ou quadrada. O anel interferométrico está localizado numa plataforma que pode rodar. Quando a plataforma está a rodar, as linhas de interferência são alteradas, em comparação com a posição da interferência padrão quando a plataforma se mantém imóvel, sendo a quantidade de deslocamento proporcional à velocidade angular da plataforma rotativa.

Quando a plataforma está em rotação, o ponto de entrada/saída move-se durante a passagem da luz, o que significa que um feixe abrangeu uma distância menor do que o outro feixe, o que cria a variação no padrão de interferências. Portanto, a interferência padrão obtida em cada velocidade angular da plataforma caracteriza diferentes mudanças de fases particulares para cada velocidade angular (Yo, 2002).

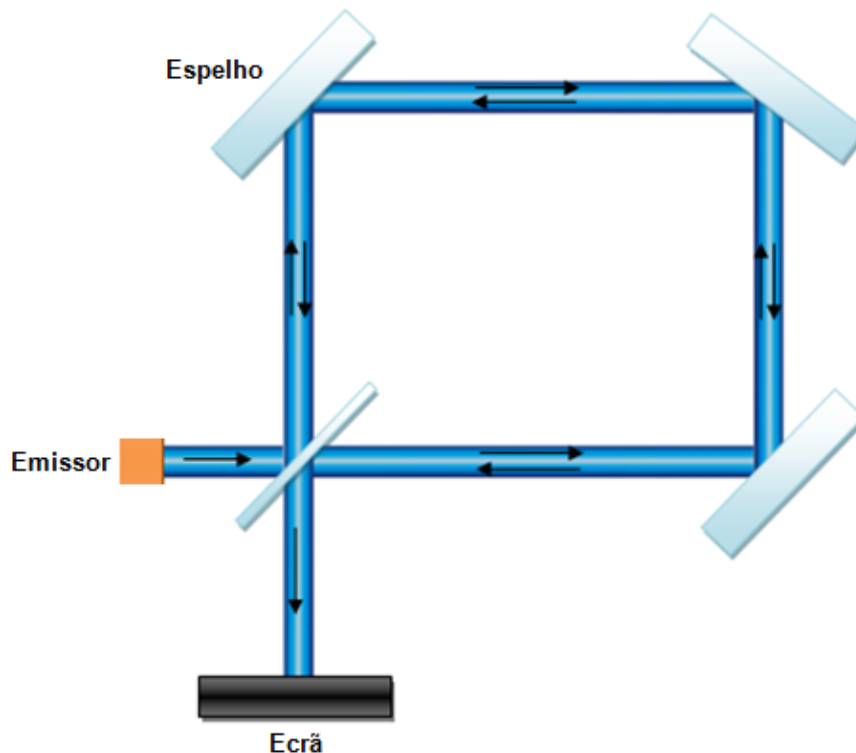


Figura 4.15 – Interferômetro de Sagnac (adaptado de Wikipédia, s. d.).

O interferômetro de Sagnac tem sido utilizado principalmente para a medição de rotações e vibrações, tendo a vantagem de ser um sensor extremamente sensível. A produção em massa de *giroscópios* de fibra óptica nos últimos anos oferece a perspectiva que o preço dos principais componentes interferométricos continuará a diminuir, permitindo sistemas com custo/benefício eficaz (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

#### iv. Medição com base no interferômetro de Fabry-Perot

No interferômetro Fabry-Perot, dois espelhos parciais são alinhados paralelamente, formando uma cavidade de reflexão. A figura 4.16 mostra dois raios de luz a entrar na cavidade reflectindo para a frente e para trás o feixe de luz. Em cada reflexão, parte do feixe é transmitido, separando cada um dos raios incidentes numa série de raios. Como os raios separados são todos transmitidos a partir de um único raio incidente, eles têm uma relação constante (admitindo que a fonte de luz usada é suficientemente coerente) (PASCAL, 1990).

A relação da fase entre os raios transmitidos depende do ângulo com que cada raio penetra na cavidade e da distância entre os dois espelhos. O resultado é um padrão de franjas circular, semelhante ao padrão de Michelson, mas com franjas mais estreitas, mais brilhantes e mais espaçadas. A nitidez das franjas de Fabry-Perot torna este interferômetro um instrumento valioso de alta resolução espectral. Tal como no interferômetro de Michelson, à medida que o espelho móvel é deslocado para uma posição mais próxima ou mais distante do espelho fixo, o padrão das franjas altera-se.

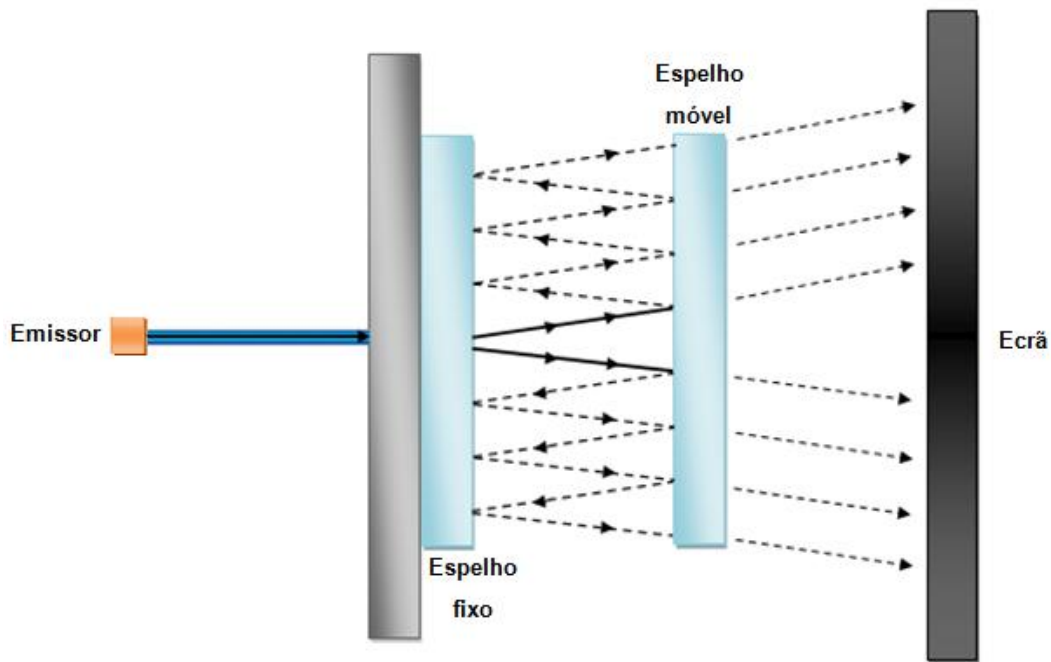


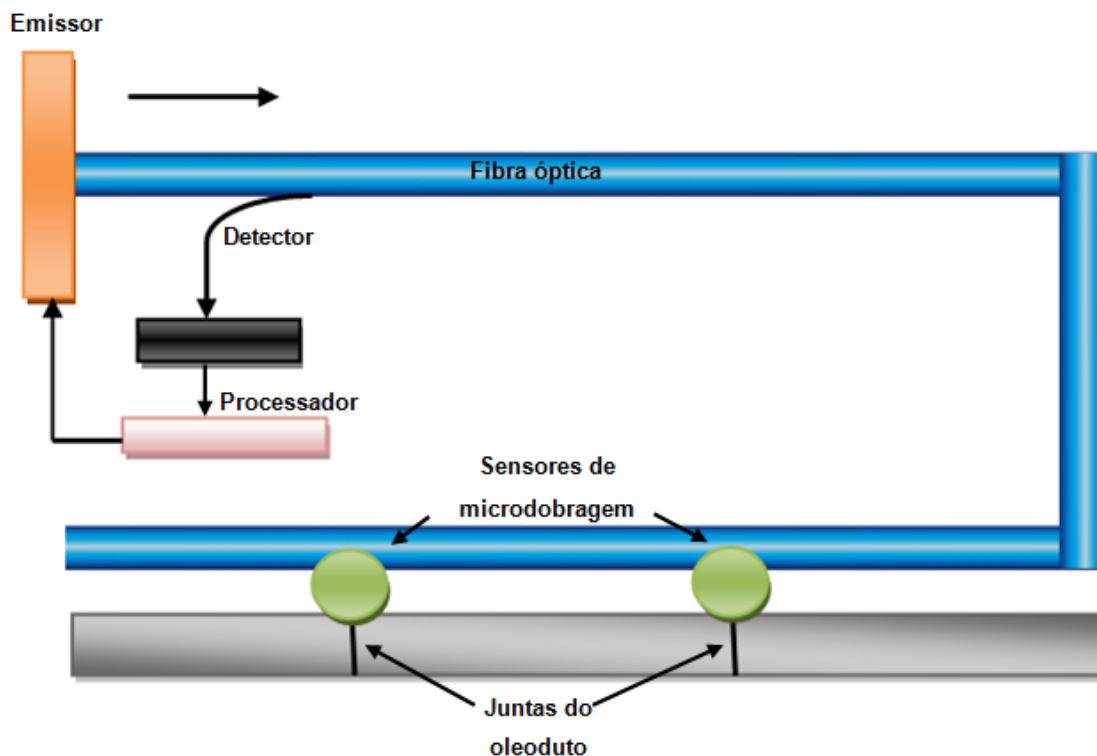
Figura 4.16 - Interferômetro Fabry-Perot (adaptado de PASCAL, 1990).

A sensibilidade de um interferômetro de Fabry-Perot pode ser muito mais elevada do que os interferômetros de Mach-Zehnder ou Michelson (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

#### 4.3.3. Com base a localização dos pontos de medida

Nos sensores de fibra óptica a medição pode ser pontual, multiplexada ou distribuída, dependendo do tipo de sensor utilizado e do tipo de medição que se pretende obter. Uma das principais vantagens associadas aos sensores de fibra óptica é a sua capacidade de medir grandezas em vários pontos com uma única fibra óptica.

Por vezes existe necessidade de recolher medições em vários pontos, o que pode ser efectuado através da organização de uma série de sensores numa configuração em rede com saídas individuais de multiplexagem. As técnicas mais comuns são a multiplexagem através do tempo, do comprimento de onda ou da polarização.



**Figura 4.17 - Métodos de multiplexagem por divisão de tempo podem ser utilizados em combinação com sensores de microdobragem de fibra óptica para localizar a ocorrência de alterações do estado de tensão em juntas de ligação localizadas ao longo de um oleoduto (adaptado de Gholamzadeh e Nabovati, 2008).**

A multiplexagem por divisão através do tempo utiliza uma fonte de luz pulsada para lançar o feixe luminoso na fibra óptica e analisa o tempo que demora a receber a informação relativa a cada um dos sensores. Esta técnica é bastante utilizada em sensores distribuídos para medições de tensões, temperaturas ou outras grandezas. A figura 4.17 ilustra um sistema de multiplexagem de divisão por tempo com sensores de microdobragem que se instalam nas juntas da tubagem de um oleoduto, pois estas ligações são locais onde poderão ocorrer, em resultado de anomalias, variações mais significativas do estado de tensão, permitindo o atraso associado a essas perdas a localização de falhas nas articulações (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

A multiplexagem através do comprimento de onda, é um dos melhores métodos de multiplexagem. Tem também a vantagem de ser facilmente integrado em outras redes,



permitindo a possibilidade de um grande número de sensores numa única linha de fibra. Cada feixe luminoso tem o seu comprimento de onda, permitindo assim várias medições ao longo de uma única fibra óptica. Na multiplexagem através da polarização, a ideia é lançar luz com diferentes estados de polarização, permitindo assim medidas múltiplas (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

A medição distribuída é mais atraente na exploração das capacidades dos sensores de fibra óptica. Um sensor distribuído é uma fibra óptica, sensível em qualquer um dos seus pontos, podendo substituir milhares de sensores isolados e permite um acompanhamento remoto (até 25 km). Esta técnica é especialmente vantajosa quando é necessária a monitorização de um grande número de pontos.

Existem dois tipos de sensores de fibra óptica distribuídos, ambos baseados na monitorização de alterações no sinal óptico: sensores de fibra óptica distribuídos intrínsecos e sensores de fibra óptica quase distribuídos (Yu, 2002).

Nos sensores de fibra óptica distribuídos intrínsecos, a medição é efectuada continuamente ao longo de toda a fibra. O tipo de sensor mais utilizado é o sensor baseado na reflectometria óptica no domínio do tempo (Optical Time Domain Reflectometry - OTDR), podendo ser de quatro tipos (Gholamzadeh e Nabovati, 2008):

- OTDR baseada na dispersão de Rayleigh, que provoca uma perda na propagação do feixe luminoso, em resultado das variações no índice de refração no núcleo da fibra óptica. Uma fracção da luz dispersa na direcção de propagação é recapturada pela fibra e lançada novamente no sentido do emissor, sendo possível determinar a variação da intensidade do sinal da dispersão de Rayleigh e assim calcular o coeficiente de dispersão ou atenuação. Como o coeficiente de dispersão de um determinado local reflecte a sua localização na fibra, analisando o coeficiente de reflexão é possível localizar a perturbação que ocorre na fibra óptica;

- OTDR baseado na dispersão de Raman<sup>24</sup>, envolvendo a dispersão inelástica dos fotões. As vibrações moleculares na fibra óptica causam uma dispersão na luz incidente. O grande problema deste sensor é o baixo coeficiente de dispersão, cerca de três vezes mais fraco que o anterior, sendo necessário uma elevada potência da luz incidente para o poder implementar;

---

<sup>24</sup> Raman (1888 - 1970) - físico indiano que foi premiado com o Prémio Nobel de Física em 1930, pelo seu trabalho sobre a difusão da luz, tendo descoberto o efeito de Raman.

- OTDR baseado na dispersão de Brillouin<sup>25</sup>, que ocorre em resultado de uma estimulação de ondas acústicas a partir de um feixe luminoso injectado na fibra e que dá origem a uma variação na frequência. Como a variação da frequência do espectro de Brillouin é sensível à temperatura e a extensões, é possível determinar variações destas grandezas físicas;
- Óptico de domínio de frequência reflectométrica, desenvolvido para aumentar a resolução espacial sem sacrificar o sinal de intensidade de dispersão, obtendo uma alta resolução espacial através de um feixe luminoso muito estreito, no que resulta uma menor retro-dispersão do sinal e aumenta o receptor de banda, requisito necessário para a detecção destes impulsos. Assim, um maior aumento no nível de ruído é esperado para que só fortes reflexões possam ser detectadas. Neste tipo de sensores, é necessária uma alta coerência de detecção.

Os sensores de fibra óptica quase distribuídos são utilizados quando os sensores distribuídos intrínsecos são difíceis de materializar ou não fornecem indicações úteis (por exemplo, uma variação uniforme de temperatura ao longo de uma grande extensão da fibra). Neste tipo de técnica as medições não são contínuas ao longo da fibra óptica, mas são efectuadas num número finito de localizações, através da alteração das propriedades locais da fibra visando a medição de uma determinada grandeza a que essa alteração é sensível. Teoricamente, ao colocar pontos de medição, por secções, sucessivamente pode-se conseguir uma medição quase distribuída (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

Existem vários tipos de sensores de fibra óptica quase distribuídos, entre os quais o sensor de fibra óptica em rede de Bragg, possuidores de características únicas, nomeadamente alta sensibilidade, uma alta capacidade de multiplexagem (como o uso de multiplexagem por divisão de onda), e boa relação custo-eficácia.

#### **4.4. Sensores mais utilizados em obras geotécnicas**

Alguns sensores de fibra óptica, devido às suas características, são mais apropriados para a aplicação na observação de obras geotécnicas. Seguidamente apresentam-se alguns desses sensores (Inaudi, 2009).

---

<sup>25</sup> Brillouin (1889 - 1969) - físico francês que contribuiu para a mecânica quântica, tendo descoberto o efeito de Brillouin.

#### 4.4.1. Sensores de fibra óptica utilizando redes de Bragg

O conceito de fibras ópticas em rede de Bragg seguiu-se à descoberta da dopagem da fibra de sílica com germânio. Foi identificado, quando se observou que um laser de ião de árgon quando dirigido para o núcleo da fibra, por uma exposição prolongada, originava um aumento na atenuação da fibra (Braga *et al.*, 2002).

As redes de Bragg são alterações periódicas no índice de refração no núcleo da fibra óptica, com elevado potencial de produção em massa, que podem ser induzidas mediante uma exposição de uma fibra, de forma adequada, a uma luz intensa UV, com um comprimento na ordem de  $10\mu\text{m}$  (figura 4.18).

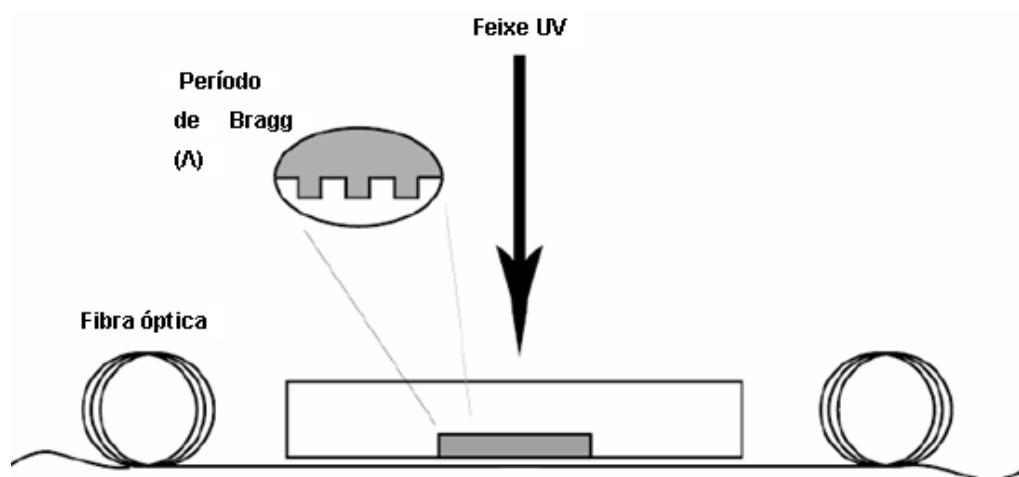


Figura 4.18 – Definição de uma rede de Bragg numa fibra óptica (adaptado de Yu, 2002).

A sua utilização como elemento sensor associa todas as propriedades comuns aos sensores de fibra óptica, nomeadamente a imunidade a interferências electromagnéticas, a passividade eléctrica, as dimensões e peso reduzidos e a capacidade de multiplexagem, o que os torna uma tecnologia bastante útil (Yu, 2002).

A informação sobre a variação de uma grandeza física na zona onde foi materializada uma rede de Bragg encontra-se codificada num parâmetro absoluto (comprimento de onda), o que torna a medição insensível a variações de potência óptica. As redes de Bragg transmitem todos os comprimentos de onda há excepção de um, que é reflectido, o comprimento de onda de Bragg (figura 4.19). A natureza ressonante da resposta espectral dos sensores de Bragg é especialmente atraente para aplicações de multiplexagem do comprimento de onda. Esta característica pode ser

convenientemente explorada numa única fibra óptica contendo diversos elementos sensores com ressonâncias de Bragg distintas. Deste modo, é possível associar cada sensor a uma determinada posição ao longo da fibra, constituindo o conjunto, um sensor quase distribuído de deformação ou temperatura. A auto-referenciação e a capacidade de multiplexagem têm sido apontadas como as principais vantagens associadas aos sensores de Bragg (Araújo *et al*, s. d.).

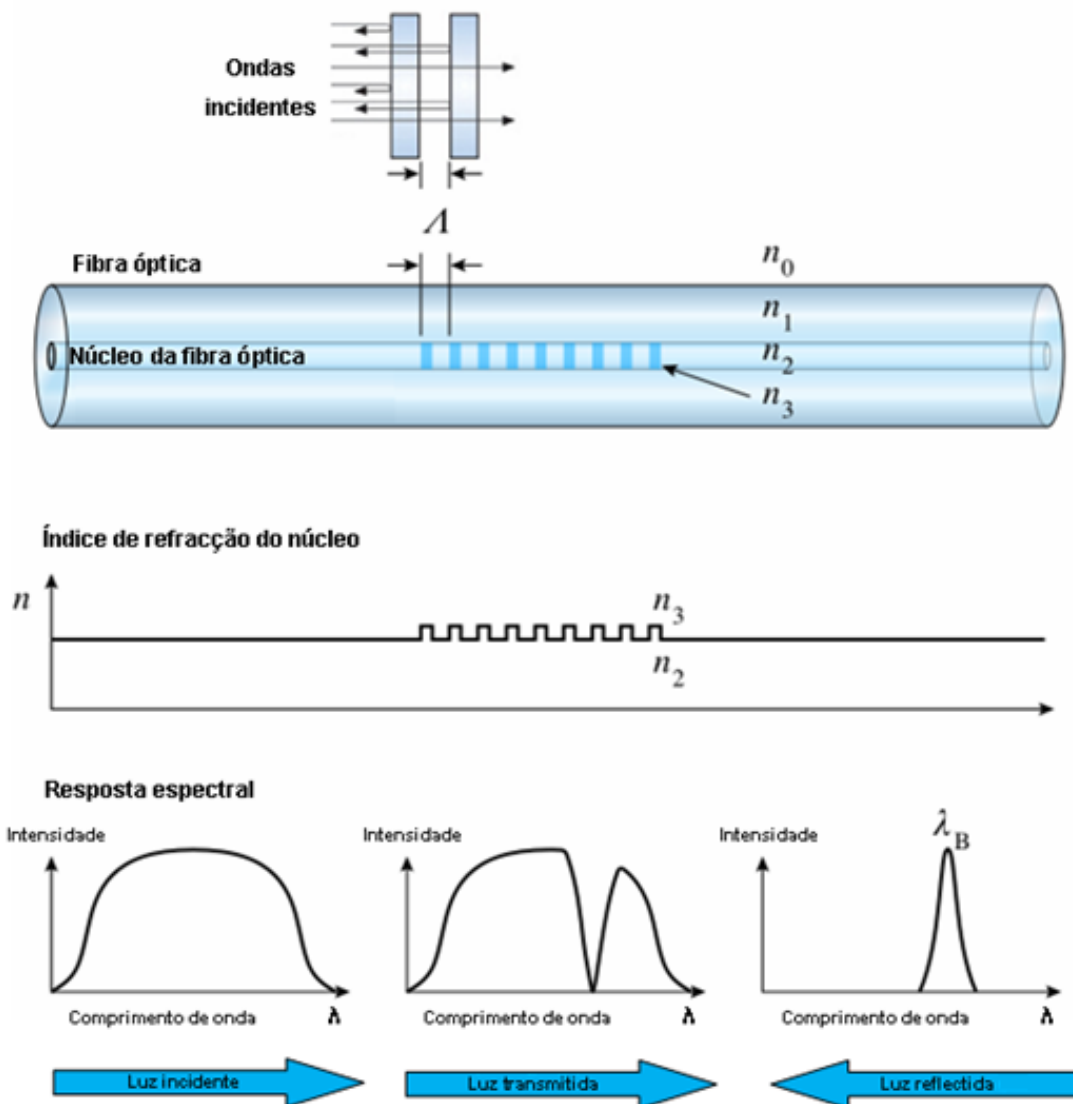


Figura 4.19 – Representação esquemática de uma rede de Bragg em fibra óptica (adaptado de Doyle, 2003).

As redes de Bragg são formadas por uma modulação periódica do índice de refração no núcleo da fibra óptica. Uma variação espacial periódica na intensidade provocada

pela interferência de dois feixes coerentes ou uma máscara colocada ao longo da fibra dá lugar a uma correspondente variação periódica no índice de refração da fibra óptica. A máxima reflectividade que ocorre no chamado comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), é dada por:

$$\lambda_B = 2\eta_{eff} \Lambda \quad (4.4)$$

onde  $\eta_{eff}$  é o índice refração efectivo do modo de propagação na fibra e  $\Lambda$  o período do FBG (Fiber Bragg Grating).

A equação (4.4) implica que o comprimento de onda reflectido ( $\lambda_B$ ) é afectado por qualquer variação das propriedades físicas ou mecânicas da região da rede. A tensão numa fibra óptica altera o índice de refração e o período, enquanto a variação da temperatura induz igualmente uma alteração do índice de refração e do período, devido á dilatação ou contracção térmica. Esta situação expressa-se na equação 4.5, onde o primeiro termo traduz a variação da extensão e o segundo a variação da temperatura:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1-\rho_\alpha) \Delta\varepsilon + \lambda_B (\alpha+\xi) \Delta T \quad (4.5)$$

onde  $\Delta\lambda_B$  é a variação do comprimento de onda de Bragg,  $\rho_\alpha$  o coeficiente fotoelástico,  $\alpha$  o coeficiente de expansão térmica,  $\xi$  o coeficiente termo-óptico da fibra,  $\Delta\varepsilon$  a variação da extensão e  $\Delta T$  a variação da temperatura. Este tipo de sensores é excelente para medições de variações de temperaturas.

O princípio fundamental de operação dos sensores de Bragg baseia-se então na medição dos desvios em comprimento de onda induzidos na condição de ressonância, por variações de temperatura, de deformação mecânica ou de tensão. No entanto, dada a importância prática atribuída aos sensores de temperatura e de deformação, a maioria dos sensores de Bragg têm sido centradas nessas aplicações (Araújo *et al*, s. d.).

Para uma variação da temperatura  $\Delta T$ , a correspondente variação do comprimento de onda de Bragg é dada por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha+\xi) \Delta T = \lambda_B \alpha \Delta T + \lambda_B \xi \Delta T \quad (4.6)$$

Quando uma fibra FGB é submetida a uma variação de temperatura, ela dilata ou contrai, o que modifica as características da fibra. O índice de refração da fibra também é alterado em função da temperatura, implicando uma variação nas características do comprimento de onda. No caso da sílica, o coeficiente de expansão

térmica tem o valor de  $0,55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e o coeficiente termo-óptico o valor de  $8,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  pelo que, na presença de variações da temperatura, a variação do comprimento de onda ressonante é dominada pela variação do índice de refração.

A variação da tensão mecânica advém simultaneamente da deformação física da matriz de sílica e da alteração do índice de refração devido ao efeito fotoelástico (Barbosa *et al.*, 2000). A variação do comprimento de onda ressonante para a aplicação de tensão mecânica longitudinal, da qual resulta uma deformação longitudinal  $\Delta \epsilon$ , é então dada por:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - \rho_\alpha) \Delta \epsilon = \lambda_B \Delta \epsilon - \lambda_B \rho_\alpha \Delta \epsilon \quad (4.7)$$

onde  $\rho_\alpha$  tem um valor numérico aproximado de 0,22.

Para medir a tensão com FBG, existem duas técnicas, dependendo do objectivo:

1. Incorporando toda a fibra no corpo (figura 4.20) cuja tensão se pretende medir, o que constitui a situação ideal para medições intrínsecas em betão e em compósitos;

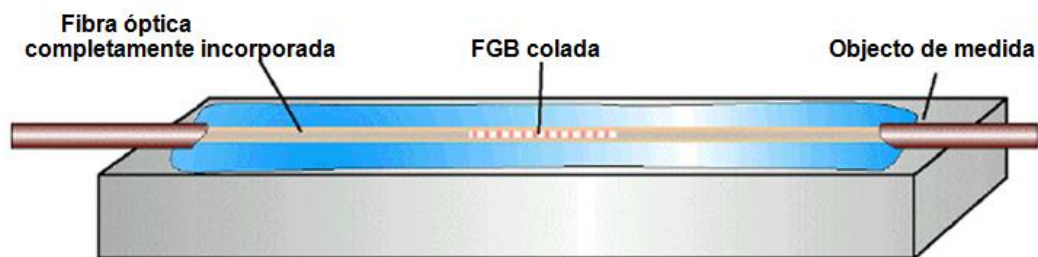


Figura 4.20 – Fixação directa de FGB (adaptado de Inaudi *et al.*, 2004).

2. Fixando a fibra em dois pontos espaçados no corpo (figura 4.21) cuja tensão se pretende medir, o que se traduz numa fixação indirecta.

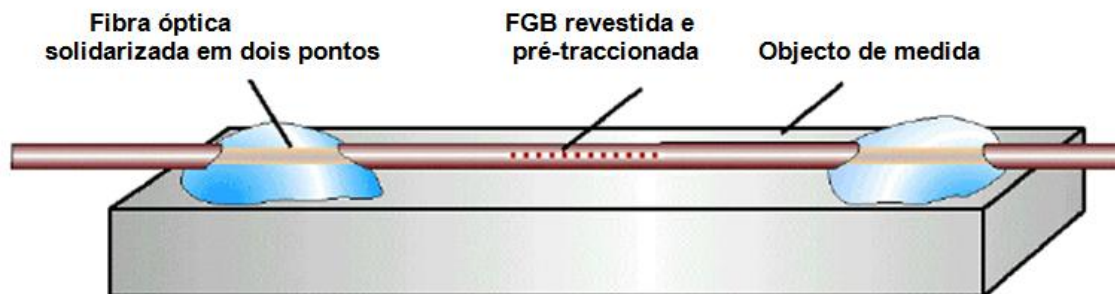


Figura 4.21 – Fixação indirecta de FGB (adaptado de Inaudi *et al.*, 2004).

Os valores normais para o comprimento de onda de uma fibra de rede em sílica são aproximadamente 1550 nm, com sensibilidade a pressões e temperaturas aproximadamente de 1,2 pm/ $\mu\epsilon$  e 10 pm/ $^{\circ}\text{C}$  respectivamente (Doyle, 2003).

O sensor FGB tem características bastantes úteis para a monitorização (Braga *et al.*, 2002):

- 1 – O sensor é uma fibra óptica modificada, tendo o mesmo tamanho e resistência de uma fibra original, contrastando com outro tipo de sensores de fibra óptica que podem pesar mais e serem menos robustos;
- 2 – Redes multiplexadas podem ser combinadas com uma fibra óptica tirando partido das técnicas de multiplexagem, conferindo aos sistemas de sensores FBG a importante propriedade de serem capazes de realizar simultaneamente um grande número de medições com poucas fibras ópticas, o que facilita a instalação;
- 3 – A temperatura e tensão podem ser medidas através do mesmo sensor; no entanto, a obtenção de medições precisas de tensão quando ocorrem simultaneamente variações significativas de temperatura, requer a implementação de redes aos pares, uma sensível à temperatura e à tensão ligada à estrutura e outra próxima, mas isolada do campo de tensões (fibra correctora), respondendo apenas às variações de temperatura.

As medidas de deformações e variações de temperatura a partir das modificações induzidas no espectro óptico de reflexão de redes de Bragg, podem ser feitas de várias formas. A escolha depende fundamentalmente da aplicação a que se destina, devendo-se, em cada caso, considerar as bandas de frequência envolvidas, o número de sensores interrogados, a sua distribuição espacial, a faixa dinâmica de deformações ou temperaturas a serem medidas, as limitações de espaço, o peso do sistema de medição e o custo (Doyle, 2003).

Para utilizar uma FGB como um sensor, tem de se iluminar a fibra por uma fonte de luz com um amplo espectro. O comprimento de onda que é reflectido é medido e relacionado com o local onde interessa efectuar as medições (figura 4.19). As alterações dos comprimentos de onda podem ser medidas utilizando um filtro óptico inclinado, que pode ser outra rede de Bragg utilizada para converter directamente variações de comprimentos de onda em variações de intensidade. Se os filtros forem concebidos para terem uma relação conhecida entre a variação do comprimento de

onda e a da intensidade, então o comprimento de onda de uma rede de Bragg pode ser determinada. Esta é a forma mais simples e económica de desmodular redes de Bragg, tendo a desvantagem de descortinar apenas uma rede em cada momento (Doyle, 2003).

Outro procedimento com potencial para aplicação na leitura de sistemas que requerem a utilização de vários sensores de rede de Bragg é baseado no método de divisão de multiplexagem por comprimento de onda, permitindo medições de extensão e de temperatura em diferentes locais ao longo de uma única fibra óptica.

O princípio deste método é simples e tem a vantagem de se poderem utilizar várias redes numa única fibra óptica, desde que cada comprimento de onda de Bragg seja diferente. Isso consegue-se utilizando uma fonte emissora de luz de banda larga e um filtro ou utilizando uma sintonização entre a fonte emissora de luz e um detector fotodiodo (Doyle, 2003). Na figura 4.22 pode-se observar como funciona este último método.

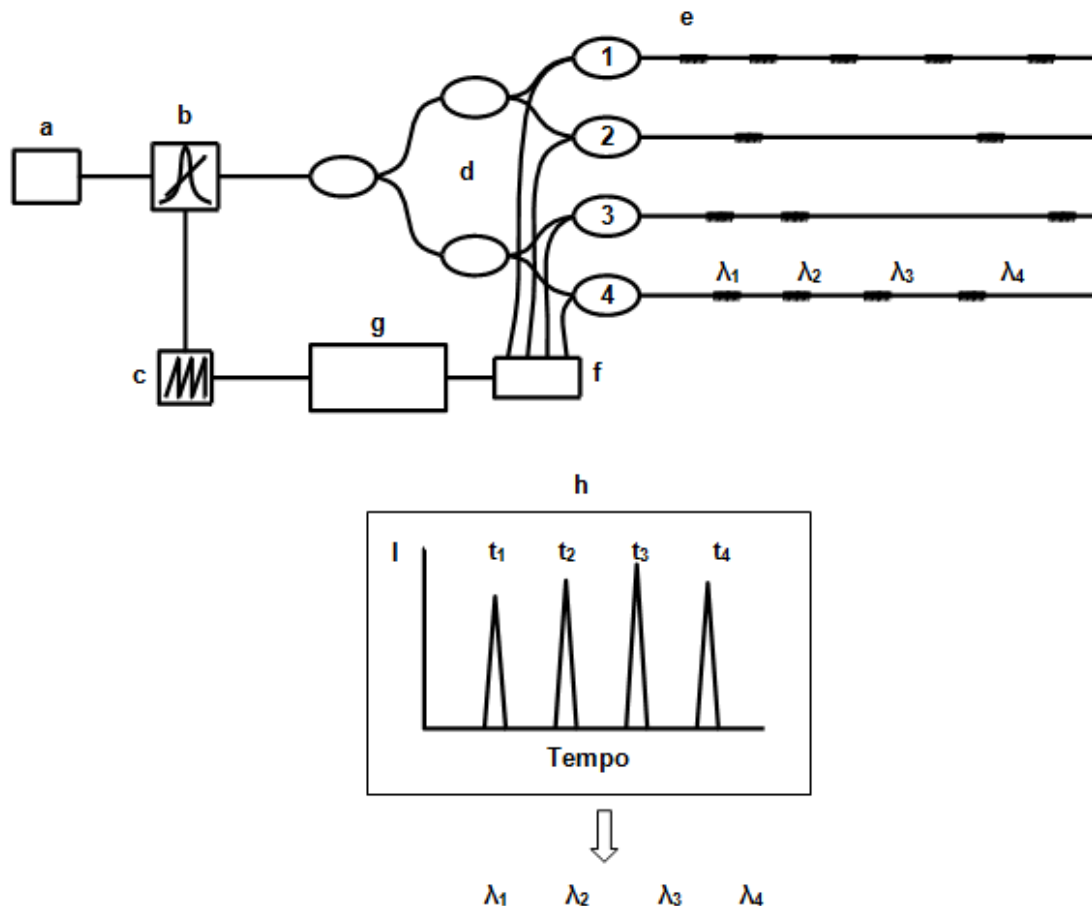
O gerador sintoniza a fonte de luz, fazendo-a percorrer o espectro em toda a sua faixa para que em qualquer instante o comprimento de onda da luz transmitida na fibra seja conhecido. Quando este comprimento de onda coincide com o comprimento de onda de Bragg de uma FBG, a luz reflectida regressa para uma célula fotoelétrica. O gerador também fornece sinal temporal para o processador, permitindo-lhe converter a intensidade versus tempo num espectro de informação. Posteriormente são identificados os picos no espectro, encontrando a sua localização, convertendo-os em extensão e temperatura (Doyle, 2003).

O método de divisão de multiplexagem por comprimento de onda caracteriza-se por (Doyle, 2003):

- 1 – Alta sensibilidade e exactidão, conseguindo para medições de extensão sensibilidade na ordem dos  $0,8 \mu\epsilon$  e exactidão  $4 \mu\epsilon$ ;
- 2 – Velocidade de aquisição dos dados moderada, ocorrendo a digitalização usualmente à velocidade de 100 Hz, o que facilita o processamento dos vários sensores;
- 3 – Flexibilidade, atendendo que, enquanto os comprimentos de onda de Bragg forem diferentes, pode ser colocada um número razoável de sensores em qualquer parte da fibra; estes sensores podem estar separados por distâncias compreendidas entre 10 mm a 1 km, que são lidos na mesma forma;



4 – O sistema composto pelo equipamento de emissão e processamento de informação tem dimensões relativamente grandes, a componente de varrimento da luz é um pouco complexa e delicada, sendo a capacidade de processamento necessária comparável a um desktop de um PC.



a) fonte emissora de luz; b) filtro; c) gerador; d) acoplador de rede para os canais de 1 a 4; e) chegada de FBG; f) célula fotoelétrica; g) processador; h) variação do tempo de saída do detector, mostrando o tempo  $t_i$  convertido em comprimento de onda de Bragg  $\lambda_i$ .

Figura 4.22 - Esquematização, equipamento e operação do princípio do comprimento de onda por multiplexagem (adaptado de Doyle, 2003).

Outro método para a divisão de multiplexagem é através do tempo (Doyle, 2003). A divisão de multiplexagem por tempo utiliza uma fonte de luz de banda larga e identifica as diferentes redes (sensores) pelo tempo que demoram os sinais a regressar até ao detector. A figura 4.23 exemplifica uma matriz de FGB a diferentes distâncias  $l$  da fonte e do detector. O tempo  $t_i$  necessário para regresso do sinal do FGB  $l_i$  é dado por:

$$t_i = 2 l_i c / \eta \quad (4.8)$$

onde  $c$  corresponde á velocidade da luz no vácuo e  $\eta$  o índice de refração da fibra óptica.

Tendo a posição de cada uma das redes numa matriz estabelecida, utiliza-se um sistema de filtros para determinar o comprimento de onda à medida que cada um deles chega.

O sistema de divisão de multiplexagem caracteriza-se por (Doyle, 2003):

- 1 – Baixo custo, atendendo a que os lasers e filtros para este sistema são de baixo custo;
- 2 – Todas as componentes são electrónicas, não existindo peças móveis, o que torna este sistema muito pequeno e robusto, e por isso adequado para várias aplicações em ambientes hostis;
- 3 – Alta *taxa de amostragem*, determinada apenas pela velocidade de processamento e não pela taxa de varrimento da fonte luminosa;
- 4 – Os sensores devem estar suficientemente afastados para os sinais regressarem em tempos diferentes.

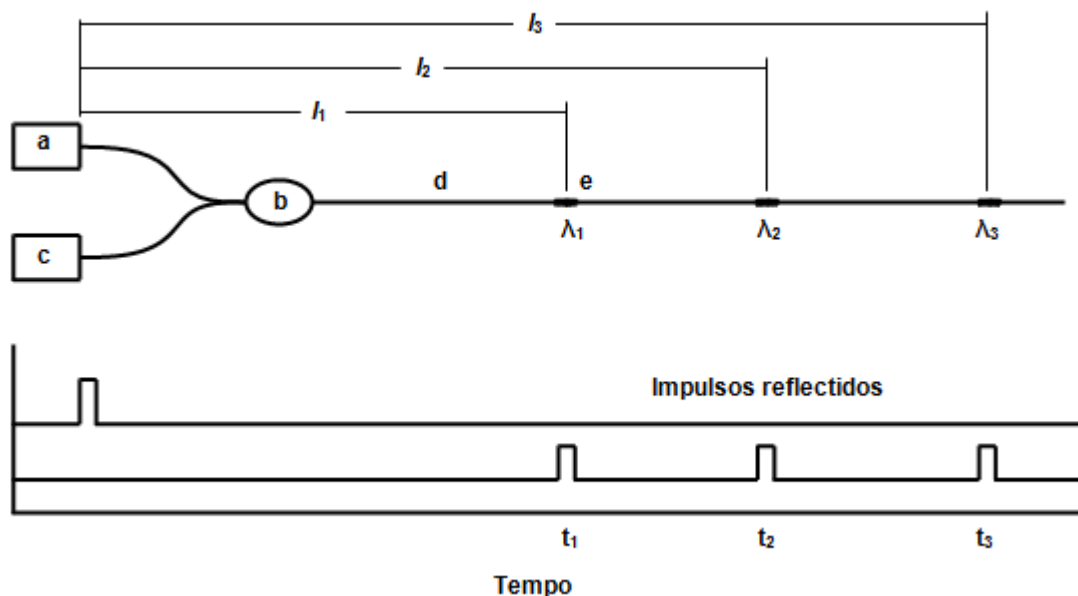


Figura 4.23 - Sistema de divisão de multiplexagem por tempo. a) fonte de luz; b) acoplador; c) detector; d) fibra óptica; e) FBG (adaptado de Doyle, 2003).

#### 4.4.2. Sensores de fibra óptica distribuídos: efeito de Raman e Brillouin

Nos últimos anos, os sensores de fibra óptica distribuídos para a medição de temperatura e tensão tem demonstrado ser uma forma eficiente de medir estes dois parâmetros, em milhares de locais ao longo de um único cabo de fibra óptica. Estas técnicas utilizam um conceito semelhante ao OTDR para a localização, considerando que a informação de variações de temperatura e de extensão é extraída a partir da dispersão da luz através do processo de Raman ou de Brillouin (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

A alteração de grandezas físicas, como a temperatura e a extensão, podem afectar a fibra óptica de vidro, localmente, ao alterar as suas características de transmissão. Como resultado, as variações podem ser detectadas e a sua localização determinada, de forma a que uma fibra óptica possa ser utilizada como um sensor.

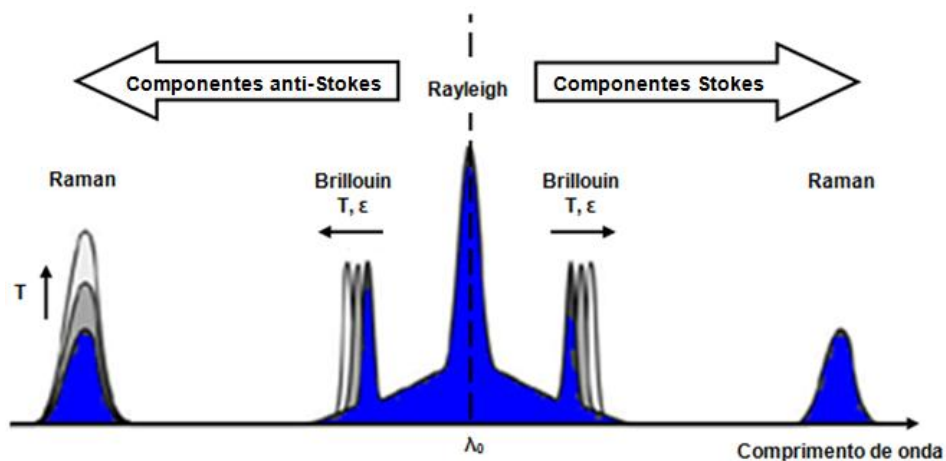


Figura 4.24 - Representação esquemática do espectro da luz difundida a partir de uma única onda do sinal de propagação em fibras ópticas (adaptado de Glisic e Inaudi, 2006).

A figura 4.24 mostra esquematicamente o espectro de luz dispersa em fibras ópticas, admitindo que apenas uma luz de comprimento de onda  $\lambda_0$  é lançada na fibra. Ambos os efeitos estão associados à dispersão, mas por diferentes movimentos devido à não homogeneidade da sílica e têm portanto, características espectrais completamente diferentes (Glisic e Inaudi, 2006).

Um emissor laser ligado a uma fibra óptica emite um raio que provoca uma interacção entre os fotões e as moléculas da fibra. A luz do laser é então dispersa à medida que o impulso do laser se propaga através da fibra em função da sua densidade e

composição assim como das vibrações moleculares e da massa. Alguns dos fótons são reflectidos no sentido oposto (Inaudi, 2005).

O efeito Raman corresponde, na teoria das perturbações<sup>26</sup>, à absorção ou emissão de um fóton através do estado de electrão, com um nível de energia virtual (Glisic e Inaudi, 2006). Existem três possibilidades:

- Não existir troca de energia entre os fótons incidentes e as moléculas (não existe efeito de Raman);
- Existir troca de energia entre os fótons incidentes e as moléculas, sendo a diferença de energia igual às diferenças da energia de vibração e rotação da molécula:
  - Se as moléculas absorvem energia ocorre o efeito de Stokes, onde o fóton resultante de menor energia gera uma linha Stokes no lado vermelho do espectro incidente.
  - Se as moléculas perdem energia ocorre o efeito anti-Stokes, onde os fótons incidentes são desviados para o lado azul do espectro, gerando uma linha anti-Stokes.

O espectro da luz inclui luz reflectida que é provocada por vibrações moleculares influenciadas termicamente. Consequentemente, a luz reflectida de Raman integra informação sobre a temperatura da fibra e pode ser usada para obter informação sobre a distribuição da temperatura ao longo da fibra. Portanto, a medição de temperatura distribuída através do efeito de Raman requer uma filtragem para isolar a frequência dos componentes, consistindo no registo da relação entre a intensidade da componente Stokes que é apenas ligeiramente dependente da temperatura e da componente anti-Stokes que tem uma forte relação com a temperatura (Inaudi, 2005).

A intensidade da luz dispersa de Raman que regressa é muito baixa, sendo necessária a utilização de fibras multimodais devido a estas possuírem uma maior abertura numérica, maximizando assim essa intensidade. No entanto, as características de atenuação relativamente elevada das fibras multimodais limitam os sistemas de Raman a distâncias de aproximadamente 10 km.

---

<sup>26</sup> Teoria das Perturbações - conjunto de esquemas aproximados para descrever sistemas quânticos complexos em termos de outros mais simples.

A dispersão de Brillouin ocorre como resultado de uma interacção entre a propagação do sinal óptico e as ondas termo-acústicas no domínio de frequências dos GHz presentes na fibra de sílica que dá origem a uma variação na frequência dos componentes, o que pode ser visto como uma difracção da luz numa rede móvel por uma onda acústica (Glisic e Inaudi, 2006).

A luz difundida é sujeita ao efeito de uma mudança de Doppler<sup>27</sup> desde que a rede móvel se propague a uma velocidade acústica. A velocidade acústica está directamente relacionada com a densidade e depende da temperatura e da extensão. Assim, a variação da frequência de Brillouin transporta informação sobre o local de variação da temperatura e da extensão na fibra. As técnicas de medição de Brillouin baseiam-se na medição de uma frequência, enquanto as técnicas de Raman na medição de uma intensidade, o que faz com que as técnicas baseadas na medição de Brillouin sejam mais precisas e mais estáveis a longo prazo, uma vez que técnicas baseadas na medição da intensidade, apesar de se caracterizarem por uma maior sensibilidade são mais afectadas por desvios (Glisic e Inaudi, 2006).

A dispersão de Brillouin tem a particularidade de poder tornar-se numa interacção estimulada, desde que um sinal óptico, designado por sinal de prova, seja usado em conjunto com o sinal óptico original, usualmente designado por sinal de bombeamento.

Essa interacção faz com que a ligação entre os sinais de prova e de bombeamento e das ondas acústicas, quando é cumprida uma condição de ressonância condicional, ou seja, quando a diferença de frequência entre a prova e a fonte de luz corresponde à mudança de frequência de Brillouin, a condição de ressonância é dependente da temperatura e da extensão, o que faz com que, determinando a frequência de ressonância, se obtenha directamente a medição da temperatura e da extensão. A vantagem desta técnica é que a relação sinal/ruído é muito mais confortável. Como resultado, a técnica de medição de luz dispersa que regressa requer maior tempo para integração que a técnica de prova-bombeamento, sendo esta mais adequada para medições rápidas (Glisic, 2005).

As técnicas de medições baseadas no efeito de Brillouin funcionam apenas com fibras monomodais, permitindo medições ao longo de várias dezenas de quilómetros. A localização da variação da extensão e da temperatura ao longo da fibra é possível utilizando um conceito de radar. Impulsos de laser ópticos são lançados na fibra óptica

---

<sup>27</sup> Doppler - Físico austríaco que descreveu pela primeira vez, em 1842, o efeito de Doopler.

enquanto a sua interação com a propagação é registada em função do tempo. Como a velocidade da luz na fibra é conhecida, o tempo da informação pode ser convertido em distâncias e a temperatura na fibra pode ser registada. Devido à alta velocidade da luz, vários quilómetros podem ser digitalizados numa fracção de segundo, produzindo milhares de pontos de medição.

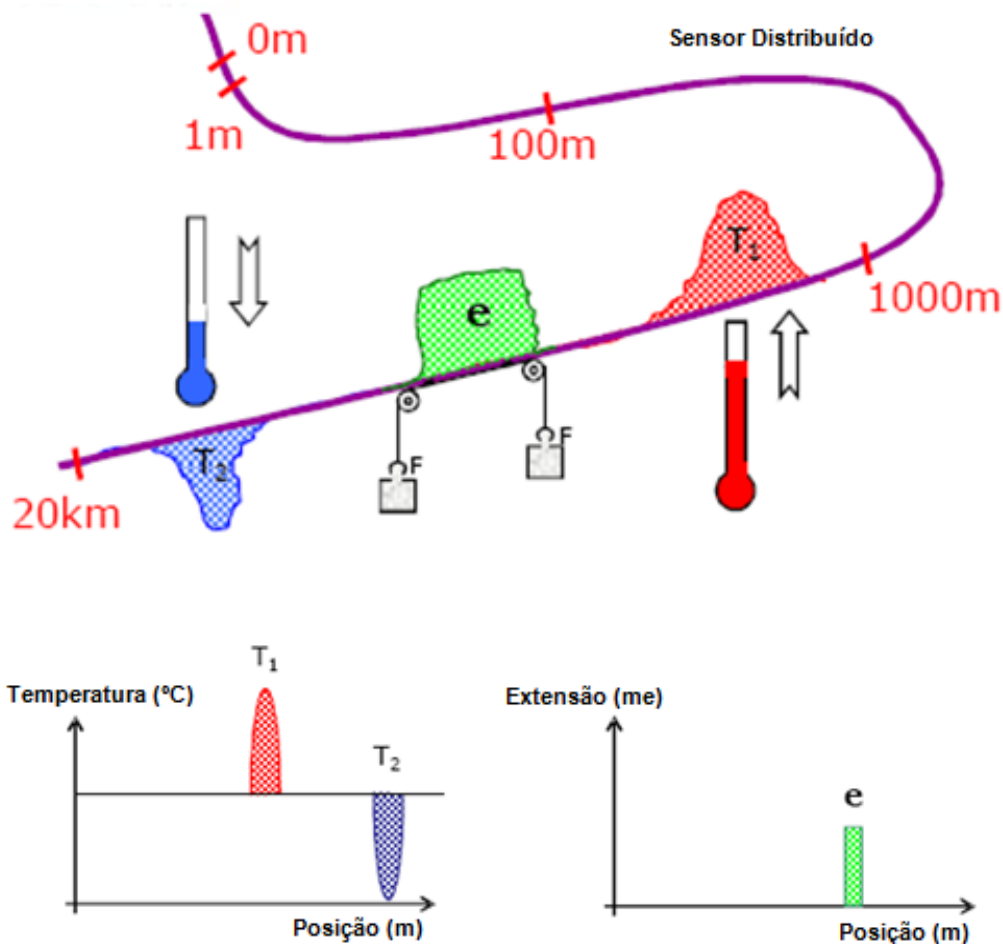


Figura 4.25 - Medição distribuída (adaptado de Inaudi, 2009).

Em geral, o sistema de Raman funciona bem com a fibra multimodal, mas têm uma distância limitada (até 10 km), enquanto o sistema de medição de Brillouin só funciona com fibra monomodal mas apresenta um alcance muito mais longo (mais de 50 Km).

Ambas as técnicas podem atingir precisões abaixo de  $1^{\circ}\text{K}$ , desde que o tempo médio esteja devidamente definido. A dispersão de Brillouin oferece uma maior relação sinal/ruído e maior qualidade nas medições podem ser realizadas em períodos mais curtos de tempo sendo, portanto, mais adequado para medições rápidas e pode ser

utilizado para medições de extensões e de temperaturas, enquanto o efeito Raman só é sensível à temperatura (Glisic e Inaudi, 2006). Na figura 4.25 pode-se observar um exemplo de medição distribuída.

#### 4.4.3. Interferómetro Fabry-Perot

No Interferómetro de Fabry-Perot (IFP) a onda proveniente da fonte luminosa é dividida por múltiplos percursos antes de ocorrer a recombinação. Uma forma de o obter consiste em construir uma cavidade óptica (entre dois planos paralelos separados por uma distância  $L$ ) que possua um único percurso o qual é atravessado diversas vezes pelo feixe incidente (figura 4.26). Se a cavidade funcionar como região de medição, isto é, como sensor, então o mensurando actuará na radiação que se propaga em cada percurso, multiplicando assim o seu efeito sobre esta (Ribeiro, 1996).

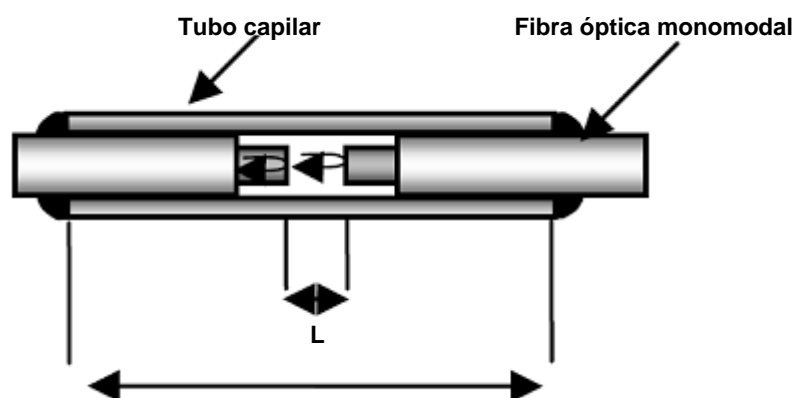
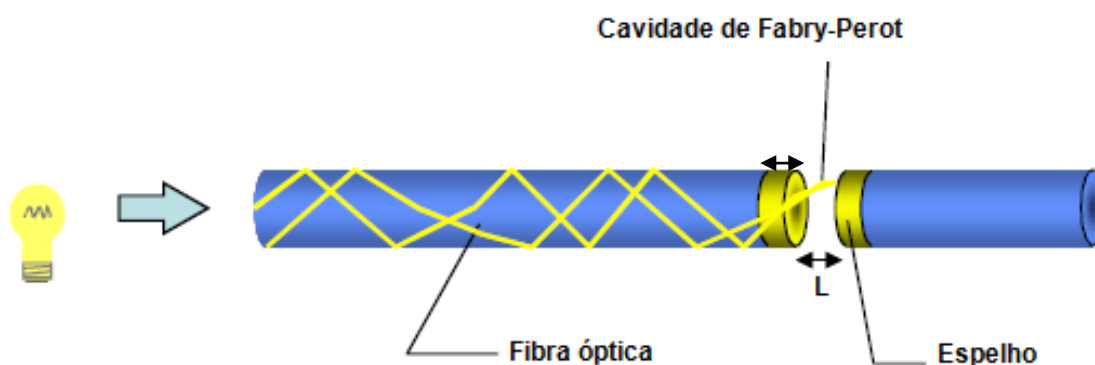


Figura 4.26 – Pormenor do Interferómetro Fabry-Perot (adaptado de Frazão *et al.*, 2007).

A cavidade consiste simplesmente numa fibra monomodal com as faces cortadas a 90 graus e semi-espelhadas, isto é, parcialmente reflectoras (Ribeiro, 1996). O alinhamento das fibras ópticas é garantido por um tubo capilar de sílica com um diâmetro exterior ligeiramente superior ao da fibra óptica em torno de 250  $\mu\text{m}$  (Frazão *et al.*, 2007.).

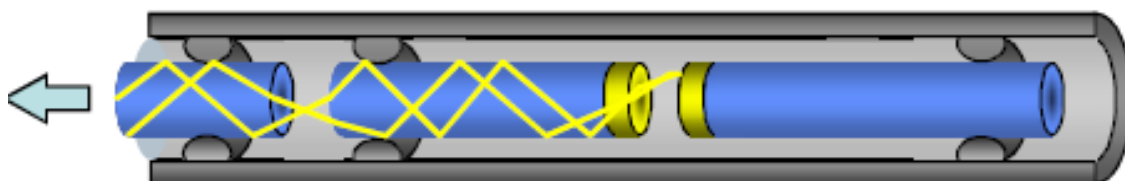
Os IFP são extremamente sensíveis a perturbações que afectem a cavidade entre os dois espelhos. Ao contrário de outros interferómetros, os IFP não contém nenhum acoplador que possa complicar o desenvolvimento e interpretações de dados. O IFP parece ser um excelente equipamento para a instrumentação de muitas estruturas, incluindo aquelas em que o sensor tem de ser incorporado no material.

Quando a luz é lançada numa das fibras (figura 4.27), uma interferência no sinal de regresso é obtida, devido à reflexão da luz recebida nas interfaces de vidro/ar e ar/vidro. Esta interferência pode ser verificada utilizando uma desmodulação coerente ou de baixa coerência técnica para reconstruir as variações no espaçamento da fibra. Uma vez que as duas fibras são associadas ao tubo capilar perto das duas extremidades (com um espaçamento típico de 10 mm), a alteração corresponderá à variação média da extensão entre o encontro das extremidades das duas fibras ópticas (figura 4.28) (Inaudi, 2005).



**Figura 4.27 – Interferómetro de Fabry-Perot (adaptado de Inaudi, 2009).**

As cavidades ópticas ressonantes deste tipo de interferómetros podem tomar vários formatos, dependendo do tipo de aplicação.

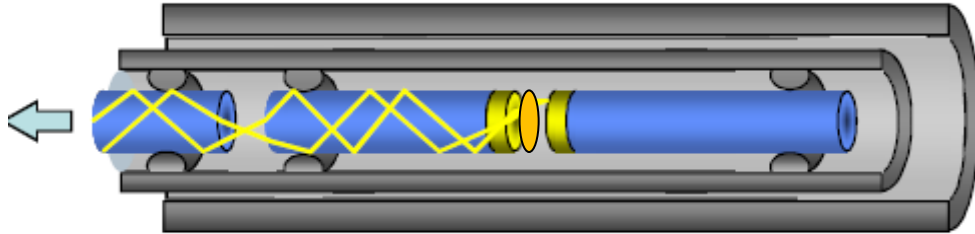


**Figura 4.28 – Interferómetro Fabry-Perot para a medição de extensões (adaptado de Inaudi, 2009).**

Para a medição da temperatura, é utilizada uma peça de vidro expansível com a temperatura posicionado na cavidade, de modo a que o comprimento da cavidade seja proporcional à temperatura (figura 4.29). Uma parte da luz é reflectida na face da fibra óptica, outra parte atravessa o vidro e é reflectida ao atingir o espelho, provocando



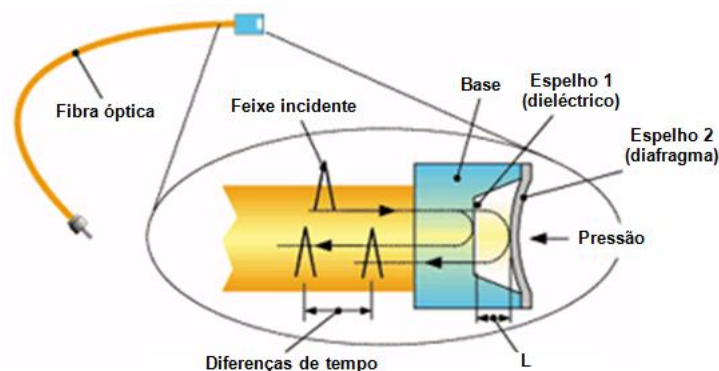
uma interferência sobre a primeira, cuja intensidade é proporcional ao comprimento da cavidade, logo à temperatura (Bortoni *et al.*, 2007).



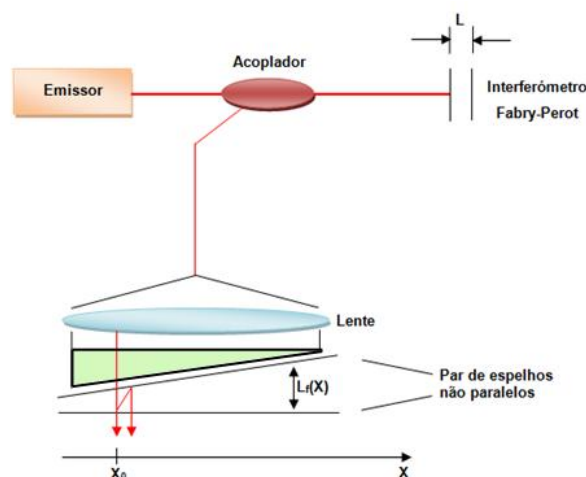
**Figura 4.29 – Interferômetro Fabry-Perot para a medição de temperatura (adaptado de Inaudi, 2009).**

Para a medição da temperatura, é utilizada uma peça de vidro expansível com a temperatura posicionado na cavidade, de modo a que o comprimento da cavidade seja proporcional à temperatura (figura 4.29). Uma parte da luz é reflectida na face da fibra óptica, outra parte atravessa o vidro e é reflectida ao atingir o espelho, provocando uma interferência sobre a primeira, cuja intensidade é proporcional ao comprimento da cavidade, logo à temperatura (Bortoni *et al.*, 2007).

A uma pressão sobre o diafragma representado na figura 4.30 corresponde uma diminuição da distância  $L$  (figura 4.30). Por sua vez, se o IFP tiver a configuração da figura 4.31, no caso de se registar um deslocamento, a cavidade, definida pelo extremo da fibra óptica e por um dispositivo triangular, a esse deslocamento irá também corresponder uma alteração da dimensão da cavidade. Assim, é possível detectar variações de pressão e de deslocamentos através de IFP.



**Figura 4.30 - Interferômetro Fabry-Perot para a medição de pressão.**



**Figura 4.31 - Interferômetro Fabry-Perot para medição de deslocamento.**

O IPF permite a medição de extensões, pressões, deformações, deslocamentos e temperaturas pontuais, apresenta estabilidade, alta resolução, pequenas dimensões, estando preparado para a instrumentação geotécnica e apresenta custos menores quando comparados com outros sensores de fibra óptica (Inaudi, 2009).

#### 4.4.5. Microdobragem

A medição da variação na intensidade da luz é mais fácil e económica do que por exemplo, a medição da fase ou da polarização. Exige apenas uma fonte de luz com potência suficiente e com boa estabilidade.

Uma forma simples de conseguir um sensor explorando a modulação da intensidade é a utilização do conceito de microdobragem. Tal como explicado anteriormente, a reflexão interna total no interior de uma fibra ocorre apenas se o ângulo de incidência está dentro de certos limites. Se a fibra é localmente dobrada com um pequeno raio de curvatura, pode-se ultrapassar esse limite, resultando assim numa diminuição da intensidade da luz que viaja na fibra devido ao facto de uma parte de luz escapar para a bainha (Jokisalo, 2006). Na figura seguinte é possível observar esquematicamente uma microdobragem.

Uma pequena distorção, geralmente indicativa de uma pressão que se exerce sobre as fibras, pode causar uma perda da luz. Mediante a medição da intensidade da transmissão da luz é possível reconstruir a deformação sofrida pela estrutura em que o sensor é colocado. A microdobragem pode estar relacionada com a temperatura, com tensões aplicadas na fibra, ou com forças de esmagamento, causando uma redução

da potência óptica, muito localizada. As alterações na intensidade são utilizadas para localizar as variações das grandezas físicas que originaram a microdobragem.

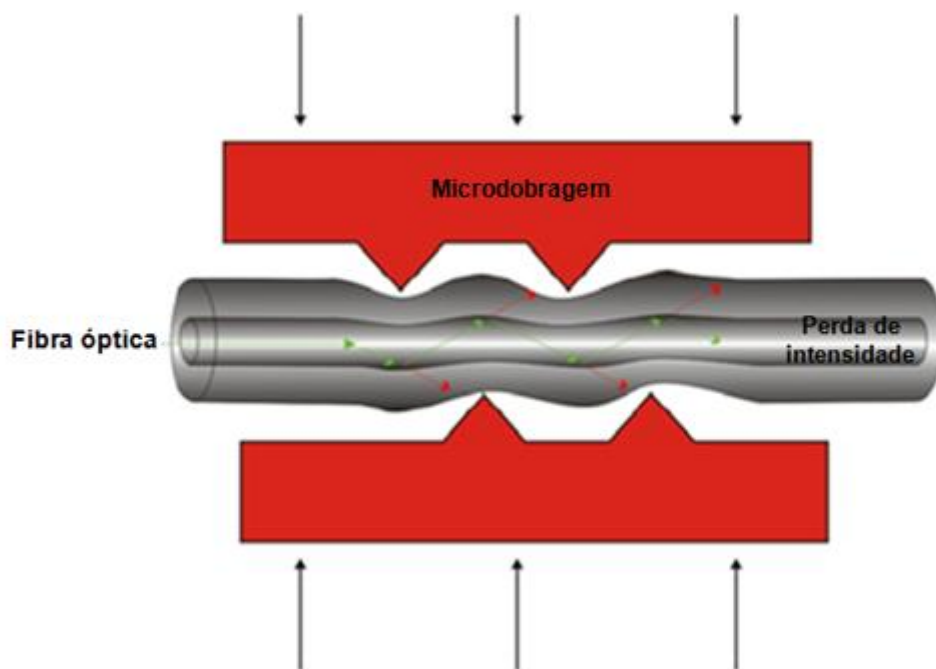


Figura 4.32 – Microdobragem (adaptado de Brunner, 2004).

Uma pequena distorção, geralmente indicativa de uma pressão que se exerce sobre as fibras, pode causar uma perda da luz. Mediante a medição da intensidade da transmissão da luz é possível reconstruir a deformação sofrida pela estrutura em que o sensor é colocado. A microdobragem pode estar relacionada com a temperatura, com tensões aplicadas na fibra, ou com forças de esmagamento, causando uma redução da potência óptica, muito localizada. As alterações na intensidade são utilizadas para localizar as variações das grandezas físicas que originaram a microdobragem.

Os sensores de microdobragem são conceitualmente simples e são particularmente apropriados para acompanhamentos a curto prazo e medições dinâmicas, bem como para a emissão de alarmes.



## 5. Instrumentação de Obras Geotécnicas

As infra-estruturas são elementos vitais para o desenvolvimento e manutenção de uma sociedade. O investimento económico e o tempo necessários para a construção de um sistema de infra-estruturas é elevado, mas, a sua correcta conservação através de inspecções, controlos e reparações evitam a degradação destas tornando este investimento mais duradouro.

A análise de comportamento das estruturas geotécnicas visa os seguintes objectivos (Pinto, s. d.):

- a) Validação dos critérios de projecto, calibração do modelo mental e modificações a introduzir no projecto em face da informação recolhida pela instrumentação durante a construção;
- b) Análise do comportamento da estrutura durante a sua vida útil;
- c) Identificação de fenómenos adversos e proposta de medidas correctivas e de reabilitação de estruturas;
- d) Reflexão sobre os ensinamentos colhidos visando a construção de estruturas mais seguras e mais económicas.

A instrumentação de uma obra geotécnica baseia-se na instalação de equipamentos destinados a quantificar grandezas pré-definidas para que, em conjunto com inspecções visuais, seja possível a observação do comportamento de uma determinada obra.

Pode-se definir a instrumentação de obras geotécnicas como uma actividade que engloba a instalação de dispositivos e instrumentos para determinação de certas grandezas, definidas em fase de obra, bem como a sua instalação em obra, execução de leituras regulares, tratamento de dados, e interpretação de resultados. Com a implementação de um plano de instrumentação podemos ainda monitorizar efeitos resultantes da construção de estruturas. Os dados resultantes do sistema de observação permitem um ajuste dos ritmos de construção, e adoptar procedimentos reduzindo os riscos de rotura. Estes podem ainda ser utilizados no aumento da qualidade do projecto de execução bem como no aumento da qualidade de construção, fornecendo registos de que o trabalho está a ser executado segundo as especificações (Carvalho, 2007).

Os dispositivos e instrumentos instalados podem providenciar alertas sobre a eventual iminência da ocorrência de roturas, permitindo a evacuação atempada em segurança de pessoal e de equipamentos e a subsequente implementação de medidas de segurança (Caspurro, 1999).

As dificuldades que as obras apresentam nos dias de hoje, devido ao seu desenvolvimento em meio urbano, às suas dimensões, aos seus custos e segurança, assim como a escassez de informação geológica dos terrenos intersectados, tornam a informação recolhida pelos dispositivos instalados de vital importância. Muitos dos problemas que ocorrem durante a fase de construção estão relacionados com mudanças inesperadas das condições geológicas, concepção inadequada do projecto e seu efeito nas estruturas adjacentes. A detecção de variações de condições do maciço envolvente, pode ser de grande valor na identificação de um potencial risco, permitindo reformular o projecto, evitando assim a ocorrência de eventuais situações catastróficas.

Em cada obra geotécnica as actividades de observação envolvem, em regra, três fases distintas:

1ª Fase – Construção: a instrumentação permite o acompanhamento da execução da obra analisando os principais parâmetros característicos, de forma a verificar a sua efectiva conformidade com o projecto e introduzir alterações para melhorar a eficácia, do ponto de vista da segurança e da economia, caso se verifique serem necessárias (Caspurro, 1999). A recolha dos dados e a análise e a interpretação dos resultados (grandezas físicas obtidas mediante o processamento dos dados), permite ao responsável pelos trabalhos compreender o comportamento real da obra que, consequentemente, leva a uma melhor previsão do desempenho real e à decisão das medidas correctivas mais adequadas a implementar;

2ª Fase – Ensaio de carga: consiste na aplicação de sobrecargas significativas às estruturas (em regra, mais penalizadoras do que aquelas que a estrutura vai suportar durante a sua vida útil) e na medição das grandezas que decorrem da aplicação dessas sobrecargas, permitindo inferir sobre o bom funcionamento das estruturas e também evidenciar eventuais anomalias que possam existir, de modo a que se possa efectuar a sua correcção antes que as obras entrem em serviço. A instrumentação permite o acompanhamento da execução destes ensaios, analisando os parâmetros característicos como as deformações, os deslocamentos, as rotações de secções e as

aberturas de juntas que são medidas com a finalidade de compreender o verdadeiro comportamento da estrutura e compará-lo com as previsões teóricas;

3ª Fase – Serviço: é o período de vida mais importante de uma estrutura. Durante esta fase, os materiais de construção estão sujeitos à degradação por envelhecimento causada por processos mecânicos (cargas aplicadas superiores às assumidas no dimensionamento) e factores físico-químicos (corrosão do aço, penetração de sais e cloretos no betão, congelamento de betão, subida nos níveis piezométricos, etc.). Como consequência da degradação dos materiais, a capacidade, durabilidade e segurança diminuem. O acompanhamento durante a fase de serviço fornece informações sobre comportamento estrutural e também regista os efeitos de sobrecargas imprevisíveis. A detecção precoce de danos é particularmente importante porque permite adequadas e oportunas intervenções. Se o dano não é detectado, ele continua a propagar-se e a estrutura pode, a determinada altura, deixar de cumprir as exigências mínimas em termos de segurança. A detecção tardia resulta em danos graves ou na necessidade de promover reparações com custos muito elevados, ou, em alguns casos, a sua própria demolição ou abandono.

De maneira geral, os dispositivos de instrumentação são usados para monitorizar estruturas nas três fases, embora seja reconhecido que a maioria dos projectistas não seja tão sensível as questões associadas à durabilidade quanto ao que acontece relativamente aos aspectos estruturais. Existem infra-estruturas em que a observação e instrumentação na fase de exploração sempre foram efectuadas, nomeadamente barragens e centrais nucleares, mas só mais recentemente, devido à pressão económica e social a necessidade de recolher informação contínua de outras estruturas na fase de serviço começou a tornar-se uma realidade. A observação de grande número de infra-estruturas na fase de construção não tinha sequência na fase de serviço durante a qual, quando muito, eram apenas realizadas inspecções visuais periódicas.

A deterioração de muitas infra-estruturas impulsionou a monitorização na fase de serviço, começando a haver consciência de que os custos de conservação e de reparação de qualquer tipo de estrutura, podiam rapidamente superar os custos de construção, embora seja ainda frequente que o Dono da Obra opte por seleccionar os Empreiteiros com base no preço mais baixo. A durabilidade não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim uma função relacionada com o desempenho dos mesmos, sob determinadas condições ambientais. O envelhecimento destes resulta das alterações das propriedades mecânicas, físicas e químicas, tanto na superfície

como no seu interior, em grande parte devidas à agressividade do meio ambiente. A ausência desta preocupação na fase de projecto faz com que, ao longo da vida útil da estrutura, os custos de conservação possam assumir valores muito elevados

A detecção, pela observação das obras, de sintomas que possibilitem a verificação de que se iniciou um processo eventualmente conducente a acidentes ou incidentes, repercutir-se-á numa diminuição de gastos, dado que permite a adopção de medidas correctivas que impeçam a progressão dos fenómenos. O que ficou dito não impede que os custos das obras sejam tidos em conta, devendo os Técnicos envolvidos no Projecto, Construção e Exploração garantir obras seguras com o menor custo possível. Também as actividades de observação estão condicionadas pelo factor económico. Contudo, o acréscimo obtido em termos de segurança e a diminuição dos custos associados a reparações futuras justificam a sua implementação.

Ao longo dos tempos optou-se frequentemente por atitudes conservativas, adoptando coeficientes de segurança elevados, majorando as acções e minorando as características dos materiais e ainda para atender aos efeitos de erros humanos. A instrumentação constitui uma forma de acompanhar a obra, tanto na fase de construção como na fase de serviço, permitir baixar conscientemente os coeficientes de segurança, em particular agindo atempadamente na prevenção de possíveis acidentes. Em tese, uma obra pode manter-se em serviço, mesmo num estado considerado crítico, se o seu comportamento estiver correctamente controlado por um sistema de observação adequado (Caspurro, 1999).

## **5.1. Barragens**

A observação deste tipo de obras tem por objectivo a avaliação das condições de segurança estrutural, a modelação do comportamento e a aferição dos critérios de projecto, desenvolve-se ao longo da vida das obras e compreende a realização das actividades preconizadas no Plano de Observação, documento que deve integrar o Projecto, bem como as respectivas adaptações, actualizações e revisões (RSB, 2007).

O Plano de Observação deve conter disposições relativas às inspecções visuais e ainda relativas à instalação e exploração de um sistema de observação (sempre que tal se revele necessário), bem como disposições relativas à análise do comportamento e à avaliação das condições de segurança da obra.



O RSB define as condições em que devem ser efectuadas as adaptações, actualizações e revisões do Plano de Observação, bem como as diferentes actividades a desenvolver nas várias fases da vida da obra para garantir o seu controlo de segurança.

A segurança de uma barragem está intimamente relacionada com os aspectos de projecto, construção, observação, exploração e manutenção. É evidente que, por melhor que tenha sido o projecto de uma barragem e a fiscalização de sua construção, só será possível exercer um eficiente controlo das condições de segurança da barragem se a mesma tiver um bom sistema de observação através de instrumentação apropriada e inspecções visuais periódicas.

As grandezas a observar numa barragem devem ter em conta as dimensões da obra e as suas características próprias. No entanto, e independentemente da adequação dos tipos de grandezas e das características e localização dos correspondentes instrumentos e dispositivos a cada caso concreto, dever-se-á equacionar sistematicamente o interesse da observação, entre outras, das seguintes grandezas (Silva Gomes e Guedes de Melo, 1993): caudais, subpressões, deslocamentos.

O sistema de observação de uma barragem na fase de construção tem como objectivo alertar sobre a possibilidade de ocorrência de anomalias na estrutura, ou de condições que as possam favorecer, possibilitando a utilização de processos menos conservativos, diminuindo o custo da obra e permitindo, justificadamente, promover revisões do projecto.

A observação nesta fase da vida da obra permite ainda fornecer informações sobre parâmetros específicos dos materiais e sobre qual a melhor época para a realização de algumas operações construtivas. Por exemplo, em barragens de betão, a injeção das juntas de contracção, a qual deve ser efectuada quando se tiverem atingido, no interior da massa do betão, temperaturas adequadas que permitam que, após a injeção das juntas, o corpo da barragem fique submetido a um estado geral de compressão. Assinala-se que as temperaturas mais baixas no interior do betão não correspondem à época mais fria do ano, atendendo a que haverá que ter em conta o desfasamento e o amortecimento das ondas térmicas exteriores.

Na fase do primeiro enchimento, considerada a fase mais crítica na vida das barragens do ponto de vista da segurança atendendo a que é durante esta fase que a obra é submetida, pela primeira vez, às acções da água, as grandezas a observar relativas às acções, as propriedades dos materiais e respostas das estruturas

permitam uma avaliação do desempenho estrutural da barragem, devendo-se fazer uma comparação das grandezas medidas “*in situ*” e as consideradas no projecto, sendo assim possível verificar se os critérios adoptados no projecto foram os adequados.

No decurso do enchimento, o conhecimento das condições de funcionalidade e segurança da obra e a avaliação da conformidade do comportamento do protótipo com o previsto para esta fase pela aplicação dos modelos das acções, estruturais ou conjuntos, utilizados no projecto deve ser tido em consideração. Deve-se ter em consideração também a situação, do ponto de vista estrutural, da barragem e da sua fundação, na época prevista para o início do enchimento, designadamente barragem concluída ou ainda em fase de construção, estado do tratamento da fundação e das juntas de contracção, a evolução prevista dos níveis da água na albufeira e os eventuais patamares de enchimento.

Por fim, na fase de exploração, o sistema de observação deve permitir controlar o desempenho geral da barragem ao longo do tempo, mediante a medição de deslocamentos, caudais, sub-pressões, etc., caracterizando a evolução do comportamento das estruturas em função da carga hidráulica e, no caso das barragens de betão, da temperatura.

Durante a vida útil da barragem é necessário desenvolver acções de conservação e de manutenção com a finalidade de preservar o bom estado das várias estruturas e, relativamente ao sistema de observação, assegurando a operacionalidade e fiabilidade dos respectivos equipamentos.

## 5.2. Túneis

A observação dos túneis assume actualmente uma importância fundamental. As actividades associadas à observação de uma obra subterrânea são vastas e por vezes complexas, pois influenciam e interagem com as tarefas de construção, exigindo uma elevada capacidade de resposta, tanto na execução como no tratamento da informação. As actividades de observação de uma obra subterrânea dependem das questões associadas à própria obra bem como às do meio em que esta se insere, necessitando de um apropriado planeamento e dimensionamento, de forma a dotar as entidades responsáveis por estas actividades com meios materiais e humanos apropriados.

A escavação de uma obra subterrânea afecta localmente a continuidade do maciço, perturbando muitas vezes de forma decisiva o seu estado de equilíbrio, adquirido ao longo de todo um processo geológico. Em consequência, é modificado o campo de tensões existentes, originando-se deslocamentos na zona envolvente da escavação, até que um estado final de equilíbrio seja atingido pela mobilização da capacidade resistente do maciço e (ou) sustimento de uma estrutura de suporte. A interacção entre o maciço e o suporte constitui um problema hiperstático, em que a carga sobre o suporte depende do deslocamento permitido ao maciço envolvente e por seu turno a colocação do suporte influencia o próprio comportamento do maciço em torno da abertura (Cunha e Fernandes, 1980).

A observação de uma obra subterrânea integra todas as medições e inspecções destinadas ao controlo e verificação da estabilidade da estrutura subterrânea – maciço escavado e (ou sustimento) que, em proporção variável, contribuem para assegurar o equilíbrio – durante a fase de construção ou, a longo prazo, na fase de exploração da obra.

O estabelecimento de um plano de observação, que deverá ser elaborado em fase de projecto e adaptado durante e após a execução da obra, é uma tarefa que deverá exigir a colaboração do projectista e cujo êxito final implica a consideração de múltiplos aspectos, tais como (Cunha e Fernandes, 1980):

*i.* Características geotécnicas do maciço – os elementos mais importantes que deverão ser tidos em conta na localização e projecto do sistema de observação a instalar são a litologia, a ocorrência de acidentes tectónicos e, no caso de rochas ou mesmo de solos sobreconsolidados, o seu sistema de diaclasamento. A maior ou menor incidência e variação, no espaço e no tempo, destes diferentes parâmetros, condiciona não só a malha de observação mas também o próprio tipo de instrumentação e frequência da sua utilização;

*ii.* Natureza, tipo e localização da obra – deverão condicionar igualmente o plano de observação da obra não só em fase de construção, mas muito especialmente, se se encarar o seu controlo em fase de serviço, dado que nem todas as técnicas de observação são compatíveis com a sua utilização naquelas fases. Assim, a natureza da obra ou a finalidade a que se destina poderão impor desde logo certos condicionalismos em relação ao tipo, robustez e protecção do equipamento a instalar.

Quanto à localização da obra, existem diferenças entre a observação de uma obra a pequena profundidade, em meio urbano por exemplo, e de um túnel profundo.

*iii.* Métodos construtivos e ritmo de construção – a observação de uma obra subterrânea durante a fase construtiva é, ainda hoje, encarada pelo empreiteiro como uma imposição que, colidindo com o ritmo de execução, lhe pode acarretar quebras na cadência de avanço. Por esse motivo, interessa que a concepção do sistema de observação e o seu “timing”, embora naturalmente sujeitos a correcções ditadas pelo conhecimento directo que for sendo obtido, sejam estabelecidos com a antecedência suficiente para permitir a sua inclusão no planeamento geral da obra.

Na fase de construção, as informações resultantes dos trabalhos de observação da obra devem servir para a escolha dos métodos de escavação apropriados, o redimensionamento dos suportes, a aferição da qualidade da obra e a elaboração do relatório de execução. Trata-se assim de utilizar os meios que permitam intervir tanto nos métodos de escavação, suportes e técnicas de execução, como realizar uma retroanálise para aferir a qualidade e o nível de segurança real da obra. O conhecimento preciso do comportamento de um túnel é cada vez mais importante à medida que novas técnicas de construção são introduzidas e, os túneis existentes, são obrigados a permanecer em serviço para além do seu período de vida teórica. O acompanhamento, tanto durante a construção como a longo prazo, contribui para o aumento do conhecimento sobre o real comportamento de um túnel e no planeamento de intervenções.

O controlo das deformações em profundidade antes, durante e após a construção do túnel é realizada através da instrumentação, colocada em profundidade para medir os "movimentos" do maciço nas proximidades da escavação. Deste modo, passará a dispor-se de informação em profundidade sobre o modo como o terreno se comportou com a aproximação da escavação, sabendo assim, se o ritmo dos trabalhos é o adequado. O controlo das deformações superficiais permitem avaliar as deformações em profundidade, pois estas transmitem-se à superfície, e consequentemente o impacto das obras (Casanova e Inaudi, 1998).

Segundo o US Army Corps of Engineers, 1978 em Bastos (1998), a instrumentação de um túnel tem como principais objectivos a detecção antecipada das condições que possam motivar a instabilidade do túnel na fase de construção, determinar o desempenho a longo prazo dos suportes após a construção e obter informação que permita analisar detalhadamente o maciço e o comportamento do sistema de suporte. Assim, durante a execução do túnel, a informação a recolher destina-se a controlar o comportamento das estruturas para, se necessário, intervir e, na fase pós construção,

a controlar a evolução das cargas e das deformações para prevenção de possíveis anomalias.

Um novo método para uma avaliação contínua da estabilidade de túneis em fase de construção ou de serviço, é o Método Extensométrico para Monitorizar CONvergências em Túneis (MEMCOT). Este método difere dos métodos convencionais pois não se limita a medições pontuais, feitas periodicamente, nem é necessária uma interrupção da realização dos trabalhos de construção ou de exploração dos túneis, o que permite uma avaliação contínua, tanto física como temporal, não sendo necessárias paragens na construção nem durante a exploração. Este novo método permite ainda uma consulta interactiva dos dados de convergência instantâneos ou acumulados, assim como as velocidades de convergência calculadas entre quaisquer intervalos de tempo escolhidos pelo utilizador, ao longo de direcções ortogonais ou inclinadas em que se determinem as convergências. Devido às características evolutivas, este método tem vindo a ser aperfeiçoado, através de novas aplicações (Dinis da Gama, s. d.).

### **5.3. Taludes**

Os deslizamentos de taludes são ocorrências susceptíveis de causar prejuízos económicos muito elevados e, por vezes, perda de vidas. Ainda muito recentemente ocorreram, no Estado de Santa Catarina, no Brasil, em consequência de uma precipitação anormal concentrada, escorregamentos com consequências catastróficas do ponto de vista humano e económico, que motivaram inclusive a constituição de um grupo de geotécnicos brasileiros que, voluntariamente, se dispuseram a estudar as causas do fenómeno e as medidas necessárias para evitar a sua repetição. Mas são inúmeras as notícias sobre deslizamentos de terras cujas consequências vão desde a interrupção de vias de comunicação até ao soterramento de aldeias ou vilas.

Neste contexto haverá que referir o deslizamento de um enorme volume de terras para o interior da albufeira de Vajont, em 1963, que originou uma onda que, após o galgamento da barragem, causou mais de dois milhares de vítimas na vila de Longarone localizada no vale a jusante.

A ocorrência dos movimentos de terrenos está condicionada por causas naturais e por causas antrópicas que podem, por sua vez, estar relacionadas com factores condicionantes e com factores desencadeantes. Os factores condicionantes correspondem a condições mais ou menos permanentes que podem influenciar os movimentos de terrenos, retardando ou acelerando a sua ocorrência. Estão

relacionados com o contexto geológico (tipo, características e disposição da litologia presente, orientação e inclinação das camadas rochosas e o seu grau de alteração e de fracturação) e com as características geomorfológicas do local (declive dos terrenos). Os factores desencadeantes resultam de alterações que foram introduzidas numa determinada vertente e que podem provocar movimentos em massa. Exemplos de factores desencadeantes são a precipitação, a acção humana, a actividade sísmica, as tempestades nas zonas costeiras e as variações de temperatura (Lamas, 2008).

Os estudos de estabilidade de taludes têm uma grande importância nas regiões de forte desenvolvimento urbano, sendo mesmo uma das áreas, dentro da problemática da geologia de engenharia, mais importantes. Ao longo do tempo, um terreno pode sofrer deformação devido a várias causas: um terramoto, alterações antrópicas, subida do nível piezométrico, cheias, etc., sendo por vezes, necessário um acompanhamento através de um sistema de observação.

A instrumentação de um talude tem o objectivo de verificar, através da medição de um conjunto de grandezas físicas, tais como deslocamentos (superficiais e subterrâneos), caudais subterrâneos e alterações dos níveis piezométricos, se o comportamento do terreno, seja talude natural, talude de escavação ou talude de aterro, se enquadra nos limites previstos no projecto, de acompanhar a evolução de possíveis movimentos de terrenos quando estes exibem sinais de instabilidade, que possam indicar que se encontram num estado de rotura progressiva.

A observação do comportamento de um talude depende do tipo de solo, das características mecânicas do terreno, da localização do nível freático, do tipo de obras estabilizadoras, etc. Os parâmetros de comportamento considerados mais importantes a controlar na observação são, de uma forma geral, os seguintes (Lopes e Mendonça, 1998):

- deformações nos reforços;
- forças nos reforços;
- pressões de terra;
- pressões neutras;
- movimentos da face;
- movimentos internos do maciço.

As deformações nos reforços são um dos parâmetros mais importante a controlar. Em associação com as forças nos reforços, dão indicações sobre o estado de tensão neles instalado, bem como acerca da rigidez dos mesmos. As forças instaladas nos reforços não são tão importantes, atendendo a que a medição da deformação é já por si só um indicador acerca do estado de tensão instalado.

As pressões de terras são outro parâmetro importante a controlar, pois através do seu valor e dos valores das deformações e forças instaladas nos reforços é possível obter informação acerca da eficácia da transferência de tensões do solo para o reforço, ou seja, da eficácia da interacção solo-reforço. A medição de pressões neutras assume particular importância quando se prevê um baixo valor da condutividade hidráulica do material de aterro.

A execução da zona adjacente à face do talude assume particularidades distintas das do restante aterro, nomeadamente: necessidade de utilização de cofragem, perda ou não, para conter os movimentos da face durante a construção, espalhamento do solo à mão ou com equipamentos ligeiros e compactação com equipamentos leves. Por isso é importante controlar o estado de deformação dessa zona, sendo possível ter uma ideia desse estado de deformação através do registo dos movimentos da face do talude (Lopes e Mendonça, 1998).

O registo dos movimentos internos do maciço, em especial na zona reforçada, é um indicador do estado de deformação instalado nessa zona.





## 6. Aplicação de Sensores de Fibra Óptica a Obras Geotécnicas

Um sistema de observação é constituído por uma rede de sensores que mede os parâmetros relevantes para o estado da estrutura e do seu ambiente. Para estruturas civis, tais como pontes, túneis, barragens, centrais nucleares, edifícios muito altos e monumentos históricos, os parâmetros mais relevantes são (Inaudi, 2005):

- Grandezas físicas: posição, deformações, inclinações, tensões, forças, acelerações, e vibrações;
- Temperaturas;
- Quantidades químicas: humidade, pH e concentração de cloro;
- Parâmetros ambientais: temperatura do ar, velocidade e direcção do vento, radiação, precipitação, neve, posição do nível freático, percolação e concentração de poluentes.

Os sensores de fibra óptica são uma tecnologia com crescente aplicação em obras geotécnicas. Em Portugal, já se adoptou, em algumas obras, este tipo de sensores, em particular na observação do comportamento de obras geotécnicas. Seguidamente apresenta-se uma breve descrição de algumas aplicações<sup>28</sup> (Fibersensing, s. d.).

### *i. Ponte D. Luís I no Porto*

A ponte D. Luís I é um arco metálico centenário situada sobre o Rio Douro, no Porto. Devido a passagem do metro no tabuleiro superior houve necessidade de promover um reforço estrutural. Para avaliar a integridade da ponte, após a implementação das linhas do metro, foi instalada uma rede de sensores para acompanhar o comportamento da ponte quando sujeita a maiores tensões. Foram utilizados 128 sensores, dos quais 10 são para a medição de temperatura e 118 para a medição de extensões.

---

<sup>28</sup> Não constitui tarefa fácil dispor, na bibliografia da especialidade, de informação pormenorizada sobre aplicações. Restrições impostas pelos donos de obra e/ou preocupações ligadas ao sigilo das tecnologias utilizadas, estão na base das principais dificuldades encontradas.

## *ii. Ponte de Vila Fria*

A Ponte Vila Fria, sobre o Rio Vizela, suportada por um arco em alvenaria, foi erguida em substituição de uma velha ponte com graves problemas de segurança. Para além da instrumentação implementada com sensores convencionais, foram instalados 85 sensores de fibras ópticas, nomeadamente sensores de Bragg, para medição de temperatura, de tensões e de deslocamentos em vários pontos críticos da estrutura. Os sensores de fibra óptica instalados na ponte foram totalmente controlados pelo uso de uma única medição concebida para a recolha e armazenamento de todos os sinais da fibra Bragg, permitindo também o acesso remoto de dados importantes.

## *iii. Ponte Circular Pedonal de Aveiro*

A Ponte Pedonal Circular em Aveiro foi concebida para ligar os três bancos do “T” criados pelos canais de Botirões, como parte da reabilitação urbana de São Roque. O sistema de observação implementado na referida ponte pedonal teve como objectivo avaliar a sua integridade estrutural, bem como a evolução do seu comportamento. A instrumentação da ponte, complementada com um plano de vigilância, permitiu obter medidas com os sensores em rede de Bragg instalados, possibilitando uma melhor calibração do modelo previsto bem como um acompanhamento, em tempo real, da estrutura. Possibilitou ainda a verificação do bom funcionamento durante os ensaios de carga, bem como durante um período de tempo de serviço da ponte. O sistema está preparado para ser ligado a uma unidade de medida sempre que haja necessidade de efectuar novas leituras.

Foram utilizados 40 sensores, dos quais 32 para a medição de extensões e 8 para medição de temperatura.

## *iv. Túnel do Rossio*

O túnel do Rossio é um túnel ferroviário construído em Lisboa no século XIX. Anomalias graves motivaram uma profunda intervenção estrutural. Essa intervenção foi acompanhada por um complexo sistema de observação destinado a funcionar apenas durante a fase de construção. Foi ainda complementarmente instalado um outro sistema destinado ao acompanhamento do comportamento da obra durante a fase de exploração do túnel.

No âmbito deste último sistema foram instalados sensores de fibra óptica, para medições de convergências em 135 secções do túnel mediante o designado MEMCOT (Método Extensométrico para Monitorizar CONvergências em Túneis), dotado de acesso remoto. Com este método, é possível calcular as convergências de cada uma das secções instrumentadas com base na medição da tensão em sete pontos simetricamente distribuídos ao longo de cada secção. Foram utilizados 840 sensores, dos quais 735 para a medição de tensões e 105 para a medição de temperaturas.

#### v. Torre Galp Energia - T3001

A Torre de destilação T3001 é uma chaminé da Refinaria de Petróleo Galp Energia em Matosinhos. Devido às elevadas diferenças de temperatura a estrutura de apoio sofreu graves danos estruturais, o que levou a um reforço, recuperação e instrumentação da estrutura. Foram utilizados 16 sensores, dos quais 8 para a medição de tensões e 8 para a medição de temperaturas.

#### vi. Ponte Sorraia

A Ponte Sorraia, sobre Rio Sorraia, em Santarém, é uma ponte em betão que faz parte da A13. No pavimento e na fundação da ponte foram colocados em simultâneo sensores convencionais e sensores de fibra óptica FBG para medições de temperatura e de forças.

#### vii. Pontes Ferroviárias de Peixinhos e Canelas

As pontes ferroviárias de Peixinhos e Canelas estão localizadas em Aveiro/Estarreja, pertencendo à Linha do Norte, a principal rede ferroviária nacional. A ponte Peixinhos é uma pequena ponte em betão enquanto a ponte de Canelas é uma ponte mista de aço e betão. Com o objectivo de caracterizar, do ponto de vista dinâmico, as duas pontes, foram instalados 20 sensores para a medição de tensões e de deslocamentos.

## **6.1. Casos de obras geotécnicas**

### **6.1.1. Barragens**

As roturas de barragens de aterro devidas a erosão interna são sempre dispendiosas, e tem implicações potencialmente catastróficas. Estas roturas são difíceis de prever, pois as suas causas são lentas e permanecem ocultas agindo em profundidade na estrutura da própria barragem (Sensornet, s. d.).

A detecção de percolação excessiva numa barragem de aterro pode ser conseguida através da medição de variações de temperatura no seu interior. Os sensores de distribuição de temperatura (DTS), utilizando sistemas de fibra óptica, permitem medir estas variações, detectando e observando fluxos de água através da barragem, possibilitando assim um alerta precoce de potenciais problemas (Sensornet, s. d.).

Na concepção de barragens de aterro com núcleo impermeável admite-se que há uma subida progressiva da linha de saturação, acompanhada de um fluxo lento através do núcleo que tende a arrastar os finos para jusante (a existência de filtros bem dimensionados destina-se a impedir esse arrastamento). No entanto, se, por qualquer circunstância não prevista, esse arrastamento ocorrer, haverá tendência para a formação de canais através dos quais a água flui com maior facilidade alterando então o perfil da temperatura no interior do corpo da barragem. A natureza desta alteração depende da estação do ano. De facto, no Inverno, quando a água da albufeira está a uma temperatura mais baixa, um aumento da taxa de infiltração irá traduzir-se numa diminuição de temperatura, enquanto que no Verão, quando a água da albufeira está a uma temperatura mais elevada, a esse aumento de fluxo corresponderá um aumento de temperatura. Estas variações de temperatura são, na maioria dos casos, muito subtis, muitas vezes inferiores a  $0,1^{\circ}\text{C}$ , podendo mesmo atingir variações inferiores a  $0,01^{\circ}\text{C}$ , o que exige, por parte dos DTS, uma elevada resolução térmica. É este o fundamento para a detecção de fenómenos de erosão interna através de medições das variações da temperatura por afluxo anormais da água da albufeira a determinadas zonas da barragem onde se instalam os DTS (Sensornet, s. d.).

Geralmente a percolação ocorre através de um processo inicialmente lento, mas que acelera progressivamente, podendo atingir-se a rotura da barragem. Segundo o documento consultado (Sensornet), a experiência mostra que a percolação tende a concentrar-se em camadas horizontais ou processar-se através de secções cilíndricas, onde o caudal pode atingir 100 a 1000 vezes o valor normal. Os sensores distribuídos

são instalados para a monitorização de barragens em que o excesso de caudal percolado pode ser muito localizado, podendo ocorrer em qualquer ponto. A monitorização destas situações com sensores pontuais é impraticável, visto que estes teriam de ser colocados exactamente nos pontos sensíveis, cuja localização, por definição, se desconhece à partida. Seguidamente apresenta-se um caso em que foram utilizadas fibras ópticas na observação da temperatura numa barragem.

A barragem de Lövön (Johansson e Sjö Dahl, 2004) na Suécia, é uma barragem de aterro zonada localizada a cerca de 120 quilómetros a norte de Östersund. Foi construída entre 1972 e 1973 e tem um desenvolvimento total de 1500 m. A maior altura da barragem é de 25 m, perto da central, onde a barragem está assente sobre a rocha. O núcleo é vertical na parte mais alta, mas muda a inclinação gradualmente na parte mais baixa da barragem. Os filtros de brita rodeiam o núcleo e os maciços estabilizadores são constituídos por brita e alguns blocos de enrocamento. O nível de pleno armazenamento (El.) é à cota 287 m, sendo a cota do nível mínimo de exploração 284 m. O nível da água a jusante está à cota 273 m e a fundação está entre as cotas 264 m e 267 m, ou seja, entre 8 e 10 m abaixo do nível da água a jusante. Isto implica que a água de percolação através da fundação e da barragem não pode ser recolhida e medida por sistemas tradicionais.

No Verão de 1998 a parte superior da barragem foi escavada até à cota 272 m ao longo de uma extensão de 80 m (desde a estrutura intacta - secção 0 / 018 até à secção 0 / 100). A escavação foi criteriosamente documentada e vários exemplos de erosão interna foram encontrados devido a filtros inadequados a jusante e a erros de construção. A partir do nível de escavação até à fundação foi construído um diafragma constituído por lamas bentónicas no núcleo mais antigo até ao substrato rochoso. Uma parede de estaca prancha foi colocada, através do diafragma até ao maciço rochoso. Perfurações e injeções adicionais foram realizados no maciço rochoso de forma a selar a parede de diafragma e a parede de estacas prancha no maciço.

Um novo núcleo substituiu a parte escavada a jusante da barragem com filtros adequados. O núcleo foi colocado sobre uma camada filtrante com uma geomembrana no topo, que estava selado em direcção às estacas-prancha (figura 6.1).

Foram instaladas fibras ópticas para medir a temperatura a montante, a jusante e sobre o coroamento do núcleo. O comprimento total de fibra instalada para medição foi de 2 477 m. A posição da fibra foi documentada, durante a instalação, em cada 5 metros. As fibras ópticas estão localizadas em oito níveis começando em El. 273 m,

perto da secção 0/010 indo, ao longo da barragem, para a secção 0/060 ou mais, regressando em seguida para a mesma elevação, como se observa na figura 6.2.

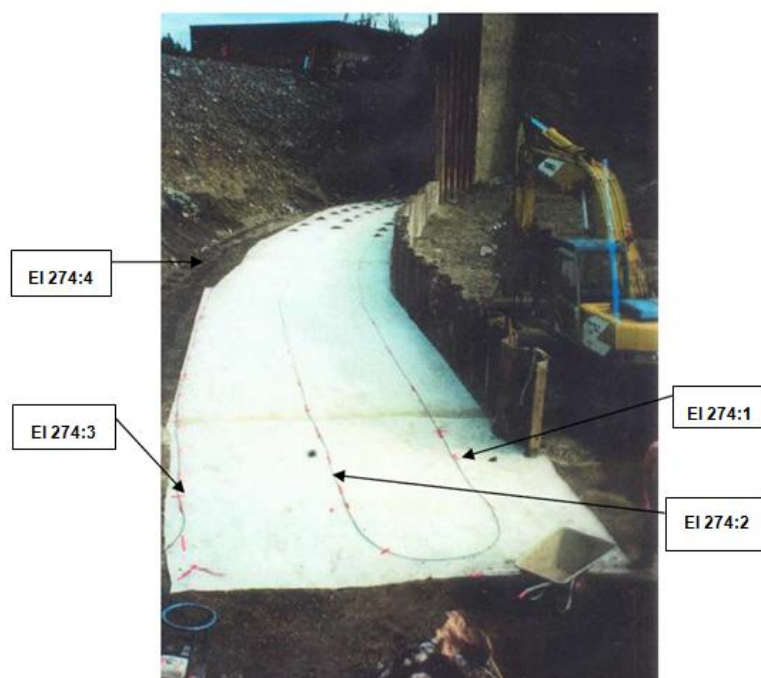


Figura 6.1 – Instalação de fibras ópticas (adaptado de Johansson e Sjö Dahl, 2004).

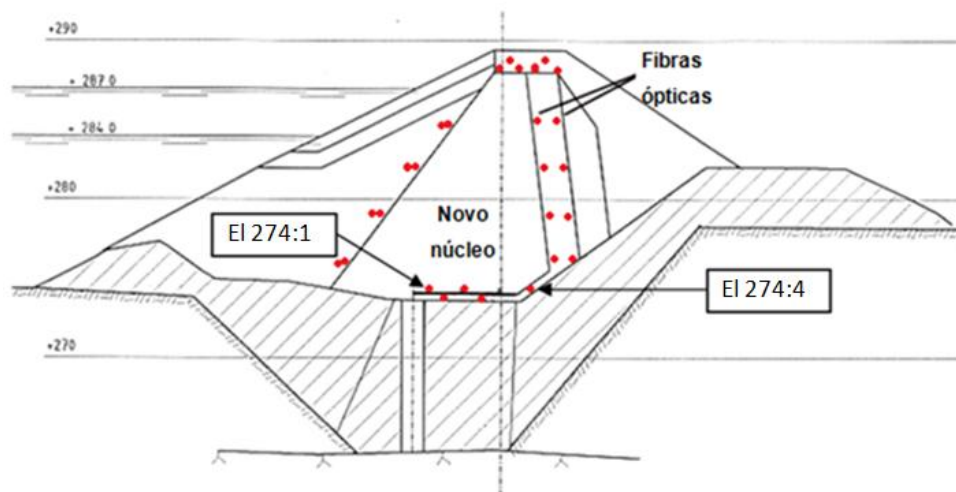


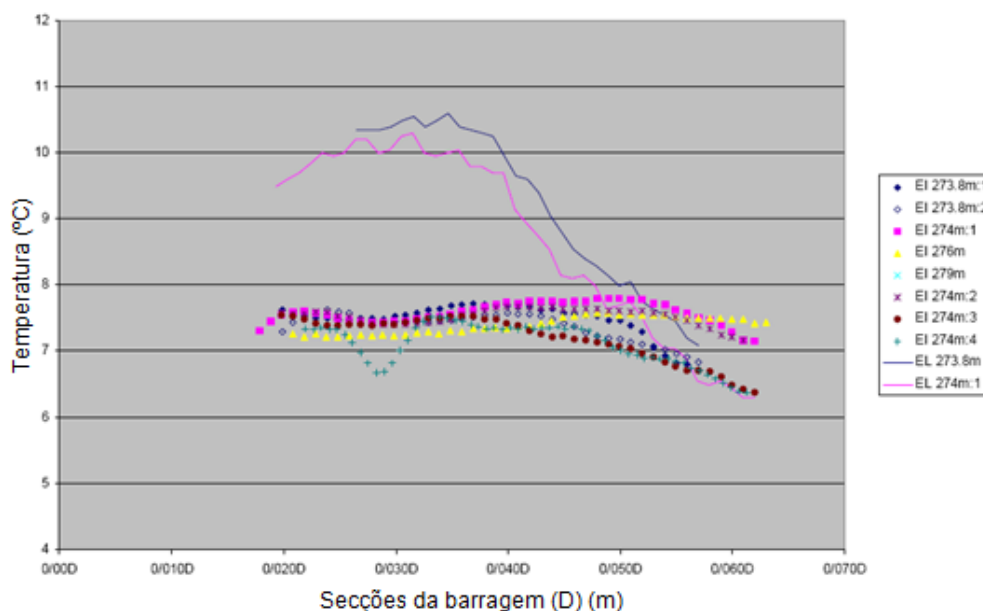
Figura 6.2 – Localização das fibras ópticas na barragem de Lövön (adaptado de Johansson e Sjö Dahl, 2004).

As primeiras medições foram realizadas entre meados de Novembro de 1998 e meados de Fevereiro de 1999. Os dados da temperatura distribuída foram obtidos

utilizando um DTS. A resolução espacial deste sistema foi de cerca de 1 m que dá cerca de 1750 valores de temperatura ao longo do comprimento dos cabos de fibra óptica instalados na barragem. A exactidão absoluta num circuito de medição é de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Este desempenho não foi, no entanto, atingido, como se concluiu no relatório, onde todos os detalhes podem ser encontrados (Johansson e Sjö Dahl, 2004).

Uma segunda medição foi feita em 2004, usando um outro tipo de DTS. Tem cerca de dez vezes maior exactidão e também é muito mais estável e confiável do que o sistema utilizado em 1998. As medições foram feitas durante seis dias, e comparadas com sensores de corda vibrante para a medição de temperatura, muito precisos.

As medições da temperatura (figura 6.3) indicam que abaixo de El. 276 m a temperatura está mais baixa em torno da secção 0/028 m e no final da parte monitorizada da barragem (da secção 0/050 para a secção 0/062 m). Todos esses pontos são certamente localizados na parte saturada, à excepção de El. 276 m que pode ficar ligeiramente acima do lençol freático. A temperatura mais baixa está no cabo mais a jusante em El. 274 m. No núcleo não existem sinais de infiltração (temperatura constante ao longo cabo El. 274 m:1-3 e no cabo El. 276 m), o que indica que o caudal principal passa através da fundação.



**Figura 6.3 - Temperatura estimada na parte saturada da barragem de El 273.8m de 276m, em 1999 (linhas sólidas) e em 2004 (ponto marcadores). As medições indicam infiltração concentrada em 0/028 (adaptado de Johansson e Sjö Dahl, 2004).**

O caudal não pode ser estimado directamente a partir destes dados. No entanto, a temperatura na secção 0/028m é semelhante á temperatura da secção 0/060, o que pode significar que os caudais nessas secções podem, portanto, ser semelhantes. As avaliações do caudal a partir da medição de temperatura dos sensores são feitas regularmente. As avaliações da temperatura no sensor 60:1 indicam um caudal de cerca de 20-30 ml/(s,m). O comprimento da zona por onde se processa a percolação pode ser estimado em cerca de 2 m, perfazendo um caudal total nessa zona de 0,05 l/s. Este caudal é inofensivo para a barragem. O caudal na secção 0/060 pode ter uma extensão de 15-20 m, o que dá um caudal total, nessa extensão, de 0.5 l/s, o que também é um caudal inofensivo.

As medições em 2004 mostram também que as fibras ainda estão a funcionar bem. A medição da temperatura pode ser executada com uma exactidão relativa melhor que  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . As temperaturas calculadas (na ordem de  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{dia}$ ) estão de acordo com as obtidas a partir dos sensores de corda vibrante, que são muito precisos.

### **6.1.2. Túneis**

Os túneis necessitam de uma adequada gestão e de um controlo de segurança, mediante uma monitorização periódica, bem como de acções de reabilitação. Observam-se frequentemente deformações excessivas e não estabilizadas que, embora raramente afectem a segurança estrutural global, podem levar a problemas de durabilidade. Além disso, o conhecimento mais correcto do comportamento de um túnel torna-se cada vez mais importante não só devido à introdução de novas técnicas construtivas como também devido ao facto de, por razões económicas e sociais, se pretender que os túneis existentes permaneçam em serviço para além da vida de serviço preconizada aquando do respectivo projecto e construção. A observação, tanto durante a construção como durante a fase de serviço, contribui para aumentar o conhecimento do verdadeiro comportamento do túnel e para o planeamento das intervenções de conservação e de manutenção.

O túnel de Shimakawahara no Japão (Inaudi *et al*, 2004), foi construído nos anos setenta para assegurar o encaminhamento de água desperdiçada, como parte de uma rede de canalização. O túnel foi construído em betão, com uma altura de 4,74 m, uma largura de 4,2 m (figura. 6.4) e um comprimento de aproximadamente 5 km.



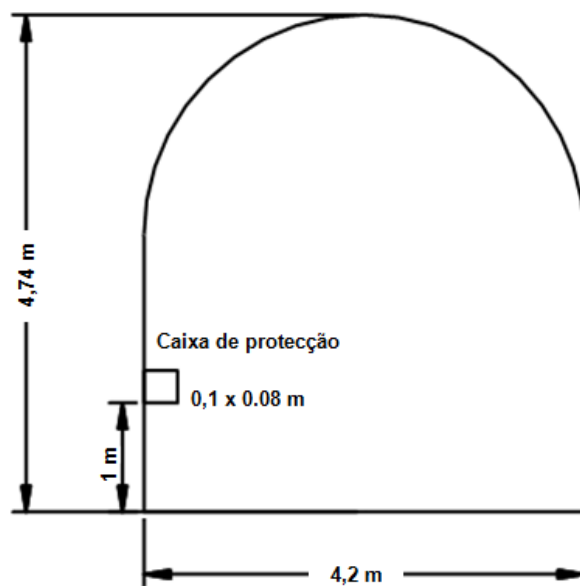


Figura 6.4 – Perfil do túnel de Shimakawahara (adaptado de Inaudi *et al*, 2004).

Para manter o túnel em serviço, foi proposto um acompanhamento utilizando tecnologia de sensores SOFO<sup>29</sup>. O objectivo da vigilância é acompanhar a degradação estrutural associada ao fluxo da água. Para acompanhar o deterioramento global das propriedades estruturais, 5 sensores de fibras ópticas com 10m foram instalados. A configuração dos sensores é mostrada na figura 6.5 e a ligação dos sensores são mostrados na figura 6.6.

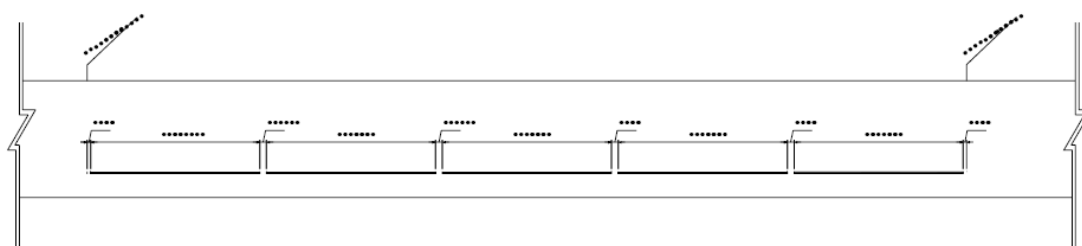
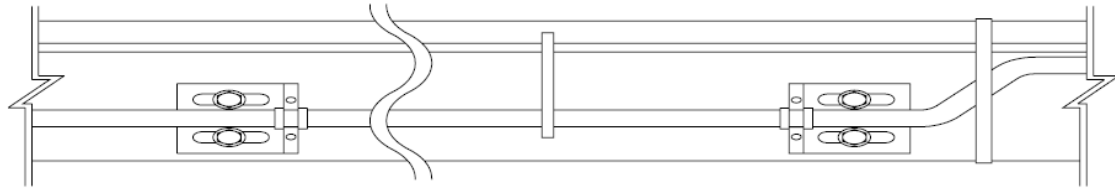


Figura 6.5 – Configuração dos sensores (adaptado de Inaudi *et al*, 2004).

<sup>29</sup> SOFO – Sistema de sensores de fibras ópticas, produzido pela SMARTEC.



**Figura 6.6 – Ligação dos sensores (adaptado de Inaudi *et al.*, 2004).**

A durabilidade dos sensores será afectada pelo fluxo da água e os ataques de detritos. Para a protecção dos sensores, estes foram cobertos por uma caixa de 100 milímetros x 80 milímetros como se representa nas figuras 6.4 e 6.7. Para evitar a ocorrência de turbulências, a ponta do protector foi fabricado como representado na figura 6.8. O acompanhamento periódico foi realizada uma vez por ano.



**Figura 6.7 – Caixa de protecção (Inaudi *et al.*, 2004).**

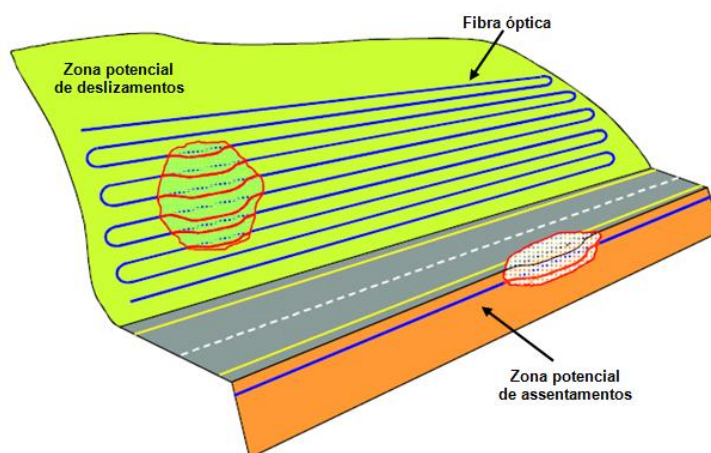


**Figura 6.8 – Fim da protecção do sensor (Inaudi *et al.*, 2004).**

### 6.1.3. Taludes

Para além de causas súbitas (concentração anormal de precipitação, ocorrência de sismos, etc.) a deformação dos taludes, naturais ou artificiais, pode também ocorrer de uma forma lenta e insidiosa até se atingir um estado a partir do qual a velocidade dos fenómenos aumenta exponencialmente, não permitindo então a aplicação de medidas correctivas em tempo útil.

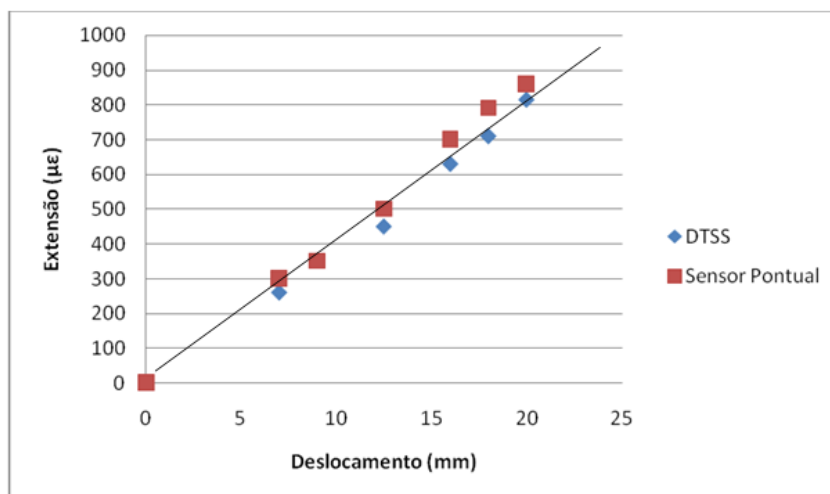
São vários os dispositivos de observação que, em taludes que podem vir a revelar instabilidades, têm sido instalados com vista ao acompanhamento do respectivo comportamento (marcas superficiais, inclinómetros com sensor móvel ou “in-place”, extensómetros, piezómetros, etc.). No entanto, em determinadas situações, em particular quando não é possível, à partida, prever as zonas mais sensíveis, a medição de deformações ao longo de sensores distribuídos pode fornecer indicações preciosas sobre ocorrências pontuais e sobre a respectiva evolução que, se devidamente analisadas e interpretadas, podem ser objecto de medidas que permitam evitar a sua propagação ou o atingir de limites de perigosidade inaceitável (Farhadiroushan et al., s. d.).



**Figura 6.9 – Modelo de estudo de deslizamentos de terrenos e assentamentos (adaptado de Inaudi, 2009).**

Este tipo de medições “em contínuo”, pode ser assegurado mediante a utilização de sensores de fibra óptica incorporada na própria estrutura (figura 6.9).

No gráfico 6.10, observa-se uma comparação entre extensómetros e DTSS, na observação do movimento de terrenos. Os resultados mostram que ambos os sistemas de medição apresentam valores semelhantes.



**Figura 6.10 – Gráfico comparativo dos resultados do sistema DTSS e sensor pontual (adaptado de Farhadiroushan *et al.*, s. d.).**

A aplicação de Sensores Distribuídos de Temperatura e Extensão (DTSS - Distributed Temperature and Strain Sensing) como um sistema de alerta precoce para deslizamentos ou subsidência de terrenos foi analisada através de um teste de campo numa encosta da Coreia (Farhadiroushan *et al.*, s. d.). Os resultados demonstraram o potencial de DTSS para observar as condições de estabilidade das referidas encostas em áreas com risco de deslizamento.

O comportamento das rochas e/ou solo pode ser verificado através do sistema DTSS, instalando um cabo de fibra óptica enterrado, que permite a monitorização periódica de extensões. Materializa-se, assim, um plano de segurança baseado na detecção de alterações nos valores das extensões medidas. Os cabos instalados no subsolo a uma profundidade de cerca de 50 centímetros são extremamente resistentes, leves e robustos, sendo concebidos para uma transferência de extensões óptima para as fibras.

Não eram esperadas, no período de ensaio realizado, a ocorrência, por causas naturais, de deslizamento ou subsidência de terras na área de ensaio. No entanto, para que este tivesse significado, foram aplicadas cargas artificiais de forma a acelerar o processo de deslizamento ou subsidência, utilizando dispositivos apropriados (figuras 6.11 e 6.12).

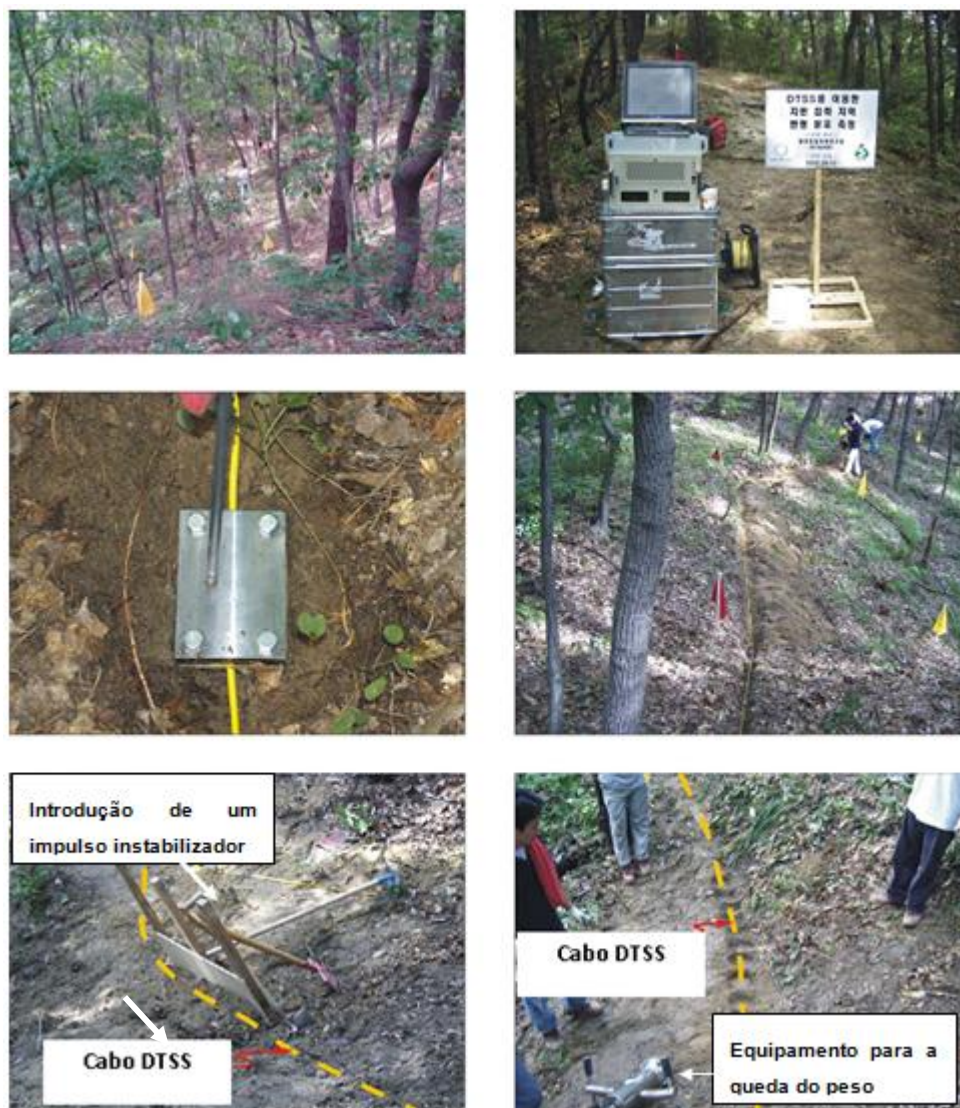


Figura 6.11 – Indução da tensão aplicada para o teste (adaptado de Farhadiroushan *et al.*, s. d.).

A força que causou um deslizamento de terras correspondeu a um aumento de extensões de mais de 1 500  $\mu\epsilon$ , dependendo da intensidade da força. Era esperado que, ao deixar cair um peso ligeiro, se iria induzir uma subsidência, de que resultou um aumento de extensão de 1400  $\mu\epsilon$ . Provou-se, através de outras experiências, que o cabo DTSS utilizado consegue medir até 28 000  $\mu\epsilon$ , em períodos de tempo curtos.

Como se observa na figura 6.13, as zonas onde foram aplicadas as tensões foram detectadas pelo sistema DTSS. Este sistema é capaz de medir movimentos de terreno ao longo de um comprimento de 10 quilómetros por cabo, sendo previsível que o sistema DTSS será um sistema de alerta eficaz e económico para deslizamento e/ou abatimentos de terras.



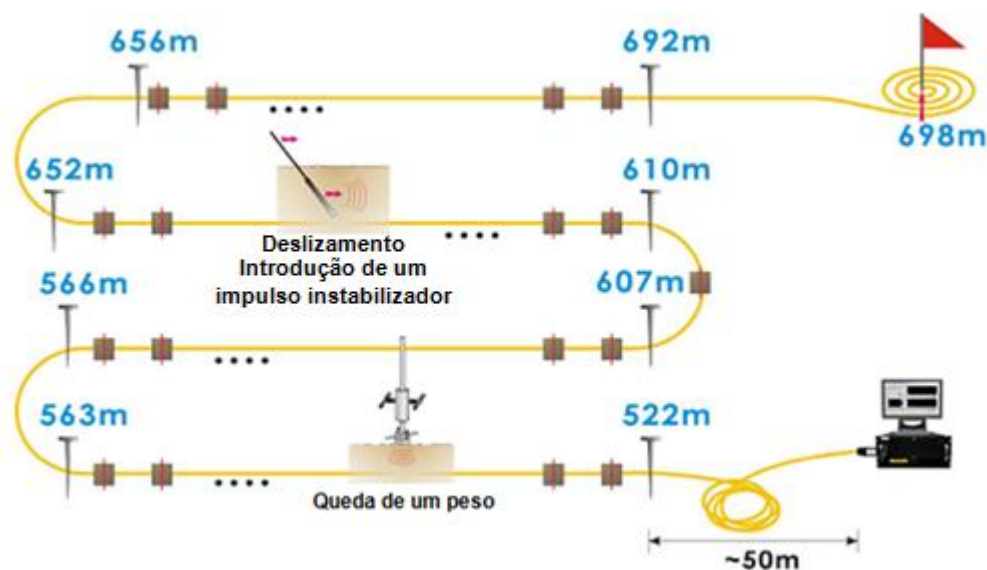


Figura 6.12 – Ensaio de deslizamento e de subsidência induzidos (adaptado de Farhadiroushan *et al.*, s. d.).

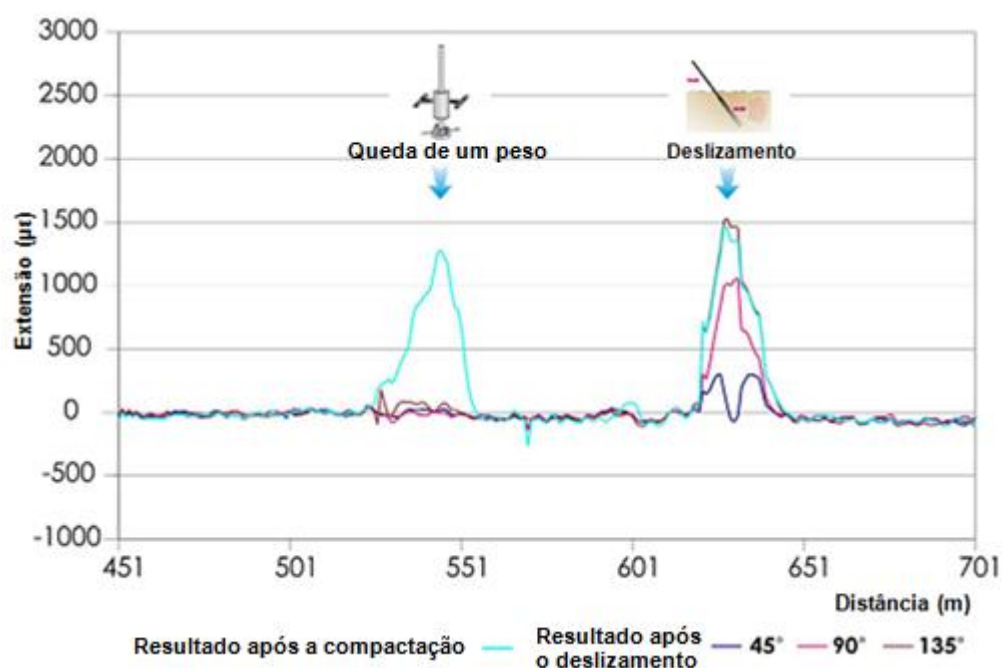


Figura 6.13 – Resultado das medições através de DTSS para deslizamento e subsidência de terras (adaptado de Farhadiroushan *et al.*, s. d.).

## **6.2. Outros casos**

Apesar de a presente tese se focar essencialmente na observação de obras geotécnicas por sensores de fibra óptica, existem outros tipos de obras de engenharia civil em que os sensores de fibra óptica foram aplicados com sucesso, nomeadamente pontes, infra-estruturas ferroviárias, oleodutos e grandes edifícios. O interesse que essas aplicações e os respectivos resultados podem ter para as aplicações específicas relativas às obras geotécnicas justifica a sua apresentação, embora de uma forma sucinta e orientada para aquele objectivo.

### **6.2.2. Infra-estruturas Ferroviárias**

Um sistema de medição de tensões foi instalado no Expresso Ferroviário Coreano (EFC) na faixa de Daejeon, Coreia do Sul, com o objectivo de analisar a integridade de um troço da via recentemente reparada (Sensornet, s. d.).

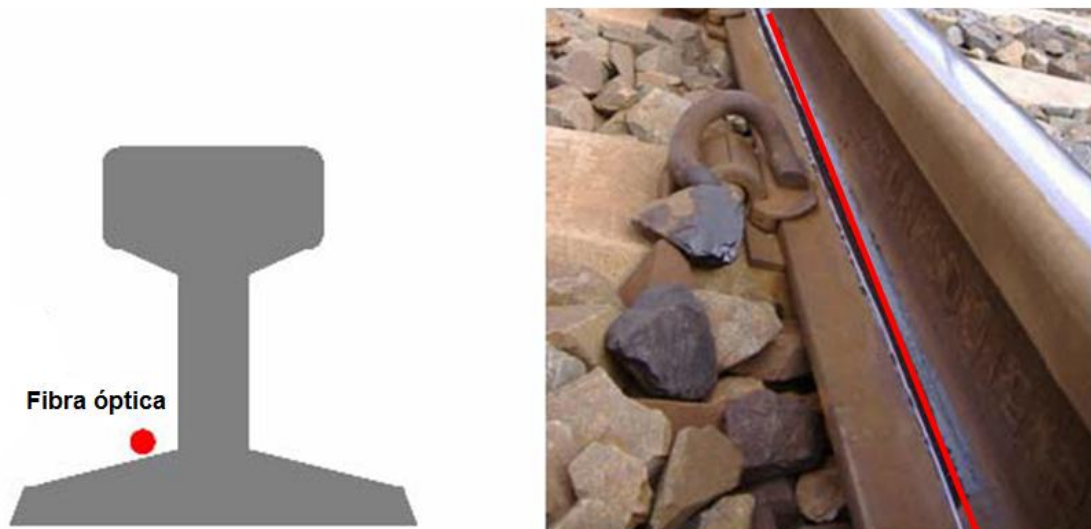
Para a observação, durante a passagem de um comboio, de uma secção de 60 metros foi utilizado um sistema DTSS. Como foi referido anteriormente, este sistema permite a medição independente de variações temperatura e de tensão ao longo da fibra instalada, devido ao espalhamento da luz de Brillouin, que ao contrário de outros sensores baseados no efeito de Brillouin, não provoca cruzamento nas medições.

O sistema DTSS está optimizado para medições que necessitam acesso a apenas uma das extremidades da fibra instalada. O aspecto inovador das fibras produzidas pela Sensornet consiste na instalação de um único sensor de fibra óptica, reduzindo assim equipamento, a instalação e instrumentação, custos e aumentando a qualidade das informações obtidas.

Em 2005, a Sensornet introduziu uma outra inovação no DTSS, conseguindo uma distribuição plena de medidas de tensões dinamicamente rápidas, conseguindo assim medir tensões com taxas de aquisição até 10 Hz, permitindo uma rápida detecção de deformações ou movimentos nas estruturas.

Para a monitorização deste caso, o sensor de fibra óptica DTSS foi instalada no carril, na sua base (local de fácil instalação e de mais alta sensibilidade a movimentos de flexão, tal como o ponto vermelho indica na figura 6.14). Como a fibra se destinava apenas a efectuar um ensaio durante um período de tempo limitado, não foi, por isso, convenientemente protegido. Se se pretendesse uma instalação visando um período

de observação mais longo haveria que dotar as fibras de revestimentos que asseguram protecções eficazes.



**Figura 6.14 – Posição do sensor de fibra óptica no carril (adaptado de Sensornet, s. d.).**

Como referido, a fibra óptica foi instalada ao longo do carril, numa secção de 60 metros, perto da plataforma de Daejeon. Na parte final da secção, a fibra atravessou uma zona que tinha sido recentemente reparada, tendo sido inserida uma junta de dilatação para atender aos movimentos associados às variações de temperatura durante o inverno e os meses de verão. Simultaneamente, uma das travessas em betão foi substituída por uma outra em madeira, pelo que seria de esperar uma maior flexão do carril nesta região (figura 6.15).



**Figura 6.15 – Travessa de madeira que substitui um de betão (adaptado de Sensornet, s. d.).**



A velocidade do comboio atinge cerca dos 300 quilómetros por hora, com um comprimento total de 388 metros e um peso estimado de 771,2 toneladas, incluindo os passageiros a bordo.

O EFC foi monitorizado quando o comboio abrandava na chegada á estação, levando aproximadamente 1 minuto a passar a secção controlada. Os dados de tensão dinâmicos foram capturados pela DTSS sendo posteriormente convertidos num mapa de duas dimensões a cor, visualizando assim de melhor forma as variações da tensão aplicada. A intensidade da tensão é visualizada segundo a cor que varia de azul a vermelho.

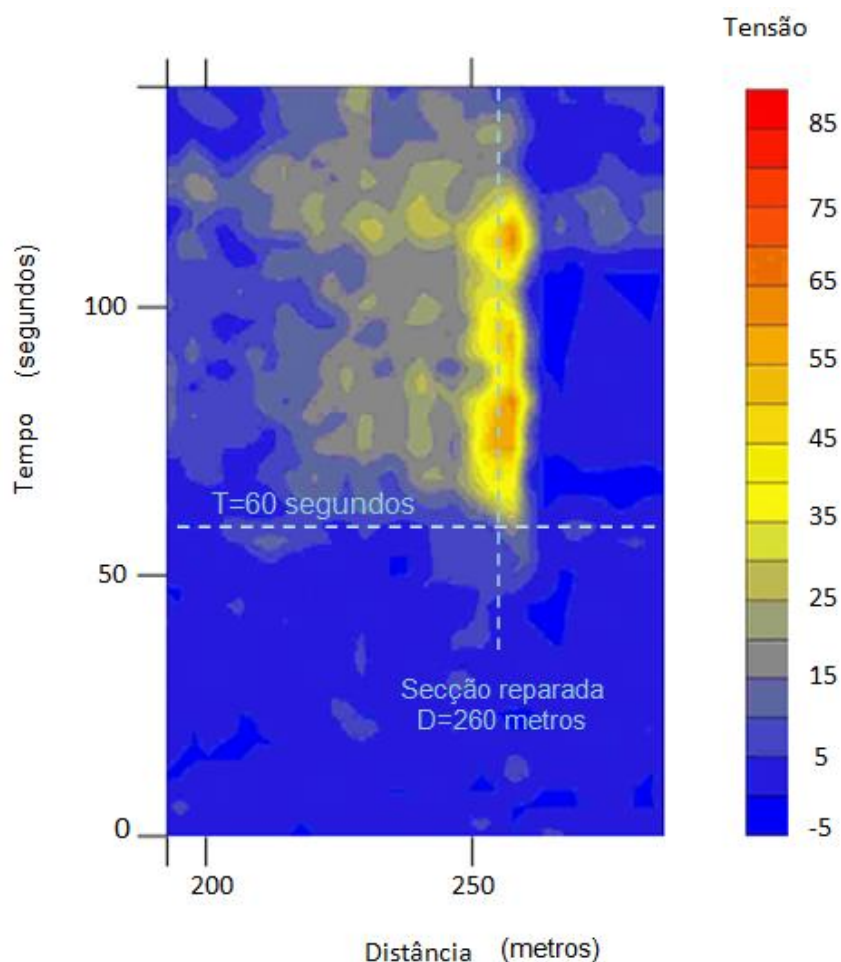


Figura 6.16 – Tensões capturadas pelo DTSS (adaptado de Sensornet, s. d.).

A secção recentemente reparada está localizada a 260 m do local de monitorização. O mapa colorido (figura 6.16) indica as variações na tensão na linha ferroviária, um minuto antes da chegada do comboio, não havendo nenhuma modificação de tensão

no carril. Esta medição serve para remover quaisquer variações a longo prazo de tensão que resulta da instalação da fibra, que é bastante normal.

Como se pode observar no mapa entre  $T=0$  e  $T=60$  segundos, a variação da tensão é mínima. Aquando a chegada do comboio, existe um aumento da tensão, passando mesmo para níveis de 90 no local da secção reparada, enquanto na secção regular a tensão encontra-se entre 30 e 50.

Segundo a Sensornet, foram realizados cálculos teóricos comparados aos resultados medidos. De acordo com os cálculos, a tensão verificou-se dentro dos limites estando os carris a funcionar dentro do exigido. Os resultados do DTSS foram excelentes e mostram que este sistema é capaz de medir pequenas variações de tensões dinâmicas nos carris durante as condições normais operacionais.

### **6.2.3. Pontes**

As pontes, em particular as pontes de betão, são as estruturas de engenharia civil que, até à data, têm sido mais instrumentadas por sensores de fibra óptica.

Os recentes avanços em sensores de fibra óptica conduziram esta tecnologia a tornar-se numa alternativa aos sensores convencionais. Entre eles, os sensores de fibra de rede de Bragg e os sensores de Fabry-Perot, que estão disponíveis para medições localizadas de extensão, e os sensores SOFO que podem fornecer uma medida muito precisa e confiável de deslocamentos de dois quaisquer pontos seleccionados numa estrutura em distâncias de 20 cm a 30 metros.

As extensões localizadas não são muito significativas na estrutura global, e como consequência, o uso de sensores contínuos com elevada exactidão e estabilidade ao longo de grandes períodos de tempo é necessário. Os fenómenos térmicos podem ser muito importantes para a integridade estrutural, podendo desenvolver complexas patologias.

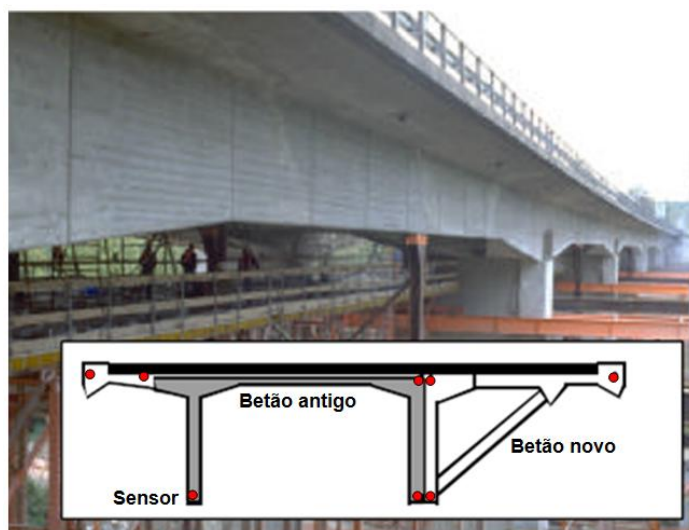
De seguida apresenta-se, a título de exemplo, um caso de estudo.

#### **Ponte de Versoix**

As Pontes Versoix de Norte e Sul (Bergmeister *et al.*, s. d.) são duas pontes gémeas paralelas. Cada uma suporta duas faixas da Auto-Estrada A9 (Suíça) que liga Genebra a Lausanne. As pontes são constituídas por duas vigas paralelas pré-esforçadas que suportam um tabuleiro com 30 cm em betão e dois prolongamentos laterais. Para

suportar uma terceira faixa de trânsito e uma nova faixa de emergência, as vigas foram alargadas e os prolongamentos laterais estendidos. Os trabalhos de construção procederam-se em duas fases: a extensão da parte interior e da parte exterior dos dois prolongamentos laterais. A primeira começou com a demolição da parte interna dos dois prolongamentos laterais existentes seguida da reconstrução do mais extenso. A segunda fase consistiu na demolição do prolongamento lateral externo mais antiga e na construção de um grande beiral apoiado por vigas metálicas. Devido ao peso e ao pré-tracção bem como a diferença na retracção entre o betão antigo e o betão novo, a ponte curvou verticalmente e horizontalmente e sofreu torções durante a fase de construção.

A observação do comportamento da ponte foi efectuada recorrendo a mais de 100 sensores SOFO, para medir os deslocamentos do betão fresco na fase de construção e controlar a longo prazo deformações na ponte. Os sensores têm 6 metros de comprimento e foram colocados paralelamente ao comprimento da ponte. Os dois primeiros vãos da ponte foram subdivididos em 5 e 7 regiões (células) e em cada célula foram instalados 8 sensores em posições diferentes nas secções transversais como se pode ver na figura 6.17.



**Figura 6.17 – Ponte Versoix, vista geral e colocação dos sensores numa secção transversal típica (adaptado de Bergmeister *et al.*, s. d.).**

A rede de sensores instalada permite seguir localmente e globalmente os deslocamentos que ocorrem na ponte. Os sensores foram utilizados pela primeira vez em separado, para quantificar a retracção do betão e estudar o desempenho dos betões de diferentes idades. Uma vez concluída a ponte, os sensores foram utilizados

em combinação para calcular a curvatura horizontal e vertical de cada célula. Através da dupla integração das medições das curvaturas, foi possível calcular os deslocamentos horizontais e verticais de toda a ponte. Durante um ensaio de carga, realizado em Maio de 1998 após a conclusão da construção, o deslocamento vertical da ponte foi medido com um deflectómetro mecânico e comparado com os resultados dos cálculos realizados a partir de leituras do sensor SOFO. A comparação entre as duas medições, juntamente com a curva de erro estimada é mostrada no gráfico da figura 6.18.

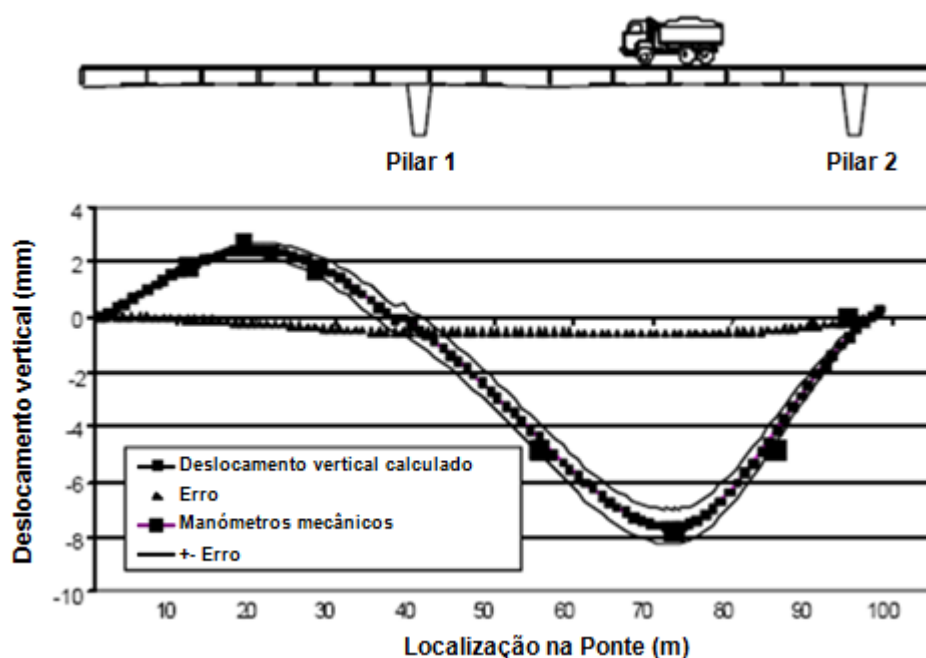


Figura 6.18 – Deslocamentos verticais calculados a partir da curvatura das medições de SOFO comparando com os extensómetros (adaptado de Bergmeister *et al.*, s. d.).

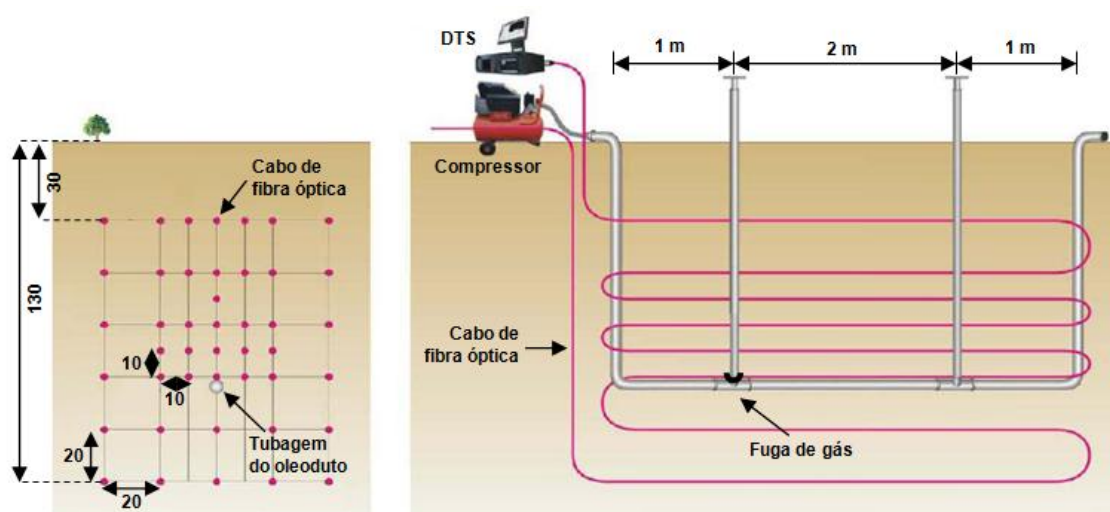
### 6.2.6. Oleodutos

A integridade dos oleodutos é de importância crítica seja qual for o produto que transporta, como gás natural ou petróleo e normalmente funcionam em áreas habitadas ou locais que apresentam elevada susceptibilidade ambiental, tais como fontes de abastecimento de água potável.

Em qualquer das situações, uma fuga no oleoduto traz problemas muito para além da perda do produto. Para além dos riscos de incêndio e explosão, colocando em perigo pessoas, bens e ambiente, uma falha num oleoduto resulta significativamente em custos directos na reparação e recuperação.

Os sensores distribuídos para a medição de temperatura e extensão (DTSS) e os sensores distribuídos para a medição de temperatura são uma boa solução para observar as variações de extensões e temperaturas com alta resolução os oleodutos.

O DTS foi testado num trecho da tubagem de Gás Nacional da Coreia em 2006 (Sensornet, s. d.), com o objectivo de detectar fugas num oleoduto utilizando um compressor de ar e um sensor DTS. Com o ar comprimido a temperatura varia ligeiramente ( $2^{\circ}\text{C}$ , em relação às condições ambientais). Nas figuras 6.19 e 6.20 é possível observar o sistema:



**Figura 6.19 – Mapa da instalação do cabo DTS para o teste de detecção de fugas de gás (adaptado de Sensornet, s. d.).**

O sensor DTS foi utilizado para observar a resposta térmica do sistema devida à expansão do gás, como resultado da ocorrência de uma fuga, sendo instalado o cabo de fibra óptica na proximidade de uma secção do oleoduto, enterrado no subsolo. O ar comprimido é utilizado para simular o gás contido no oleoduto. O oleoduto contém válvulas para permitir a simulação de uma fuga – pode ser criada uma fuga de gás através da abertura da válvula. O cabo de fibra óptica foi instalado tão próximo quanto possível do oleoduto para se obter resultados com exactidão, utilizando uma armação para amarrar o cabo, de forma a facilitar a instalação. Foi criada uma fuga através da abertura de uma válvula (pelo uso de uma extensão para manipular a válvula), no oleoduto subterrâneo.

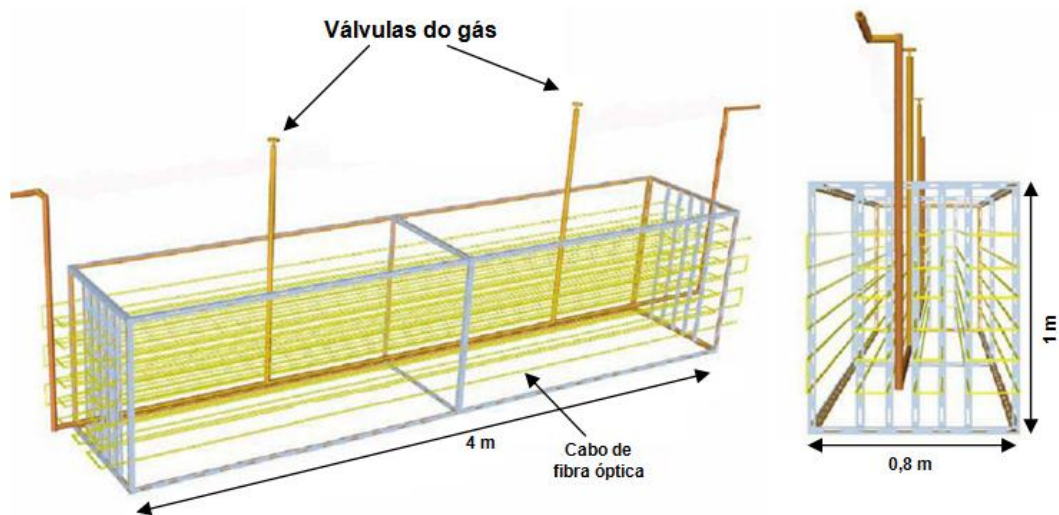


Figura 6.20 - Estrutura feita para a instalação dos cabos de DTS á volta do oleoduto (adaptado de Sensornet, s. d.).

Durante 140 minutos o local das válvulas, que permitem causar a fuga de gás foi observado, sendo detectadas variações na temperatura muito pequenas. Estas variações ocorrem devido à expansão do gás, que causa um decréscimo na temperatura de cerca de 2°C, no ambiente em redor ao local da fuga após cerca de uma hora. Na figura seguinte, é possível observar a variação da temperatura (figura 6.21) num modelo 2D através do sensor DTS.

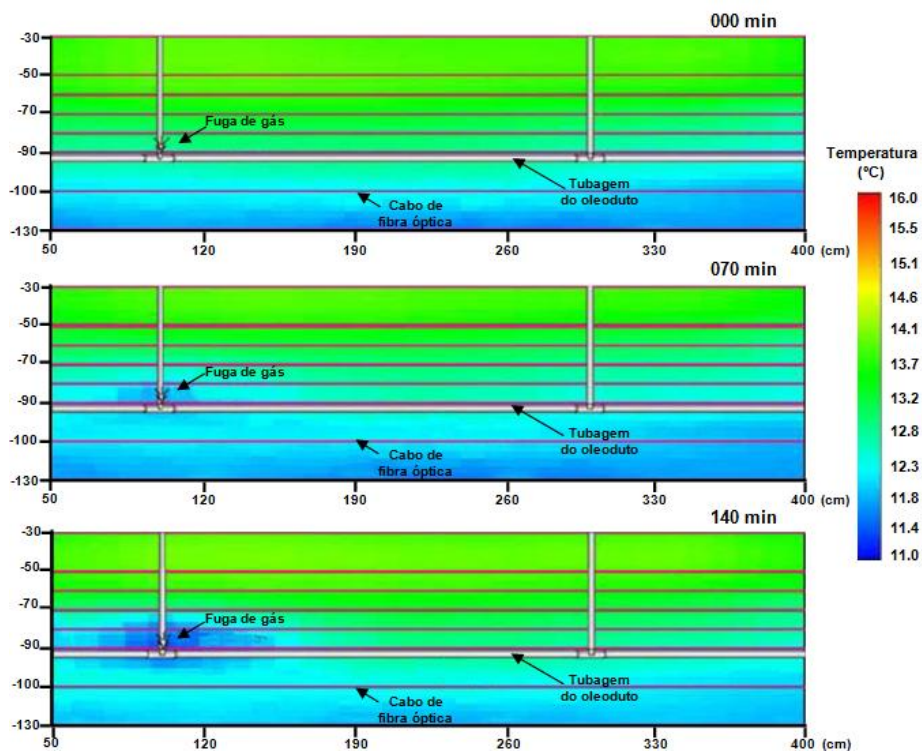


Figura 6.21 – Variação de temperatura no oleoduto com o tempo, devido à fuga exibida (adaptado de Sensornet, s. d.).

## 7. Perspectivas

No capítulo anterior descreveram-se casos de obra com aplicações bem sucedidas de sensores de fibra óptica. Outras aplicações até hoje, tanto quanto foi possível verificar através da consulta da bibliografia disponível, afiguram-se no entanto passíveis de ser implementadas.

Referem-se nos itens seguintes três possibilidades de novas aplicações:

### 7.1. Medição de deformações ao longo de galerias enterradas com circulação de produtos agressivos

É muito frequente existirem galerias subterrâneas em cidades com séculos de existência. À medida que as cidades e a tecnologia se desenvolvem, novas infra-estruturas são construídas assentes nas galerias não dimensionadas para as suportar. Em Lisboa, existem várias galerias subterrâneas que transportam produtos agressivos. Em muitas delas, não são conhecidos os seus percursos nem se sabe a integridade das suas estruturas.

O caneiro de Alcântara, por exemplo, é um colector de águas residuais e pluviais com mais de 60 anos, que inicia o seu percurso na Damaia (concelho da Amadora), passa por Benfica e desagua no rio Tejo.

A ruptura deste colector, associada à erosão do solo, foi apontada como a causa mais provável para a abertura de uma enorme cratera que, a 25 de Novembro de 2003, «engoliu» um autocarro que se encontrava estacionado junto à estação de Campolide, perto do bairro da Liberdade. O acidente constituiu numa rotura da estrutura do Caneiro, junto do seu hasteal direito, levando ao aluimento de terras e à abertura de uma cratera no pavimento, colocando em risco um muro contíguo em terra armada (figura 7.1).

O acidente, para além dos evidentes danos gerados, revelou-se de difícil resolução. O aluimento contínuo de terras para o interior da cratera e o transporte das mesmas pelo caudal existente no Caneiro, potenciava um cenário de rotura progressiva sem quaisquer garantias de segurança para a execução dos trabalhos de estabilização do acidente e de reparação do próprio caneiro (Ramos e Xavier, 2006).





**Figura 7.1 - “Cratera” gerada no pavimento após o aluimento de terras originada pela rotura do hasteal direito do Caneiro (fotografia tirada pelo jornal Expresso em Novembro de 2003, logo após o acidente).**

A estabilização da zona do acidente foi conseguida através da execução de um anel em betão projectado com duas camadas de malhasol ligado à superfície dos taludes da cratera por uma malha de pregagens radiais, vibrocavadas contra a superfície do terreno, conseguindo conter o aluimento de terras.

Adicionalmente, foi implementado um sistema de alvos topográficos que, colocados ao longo do pavimento e da superfície do “anel” de betão projectado, possibilitou a realização de leituras que permitiriam tirar elações acerca da evolução das deformações.

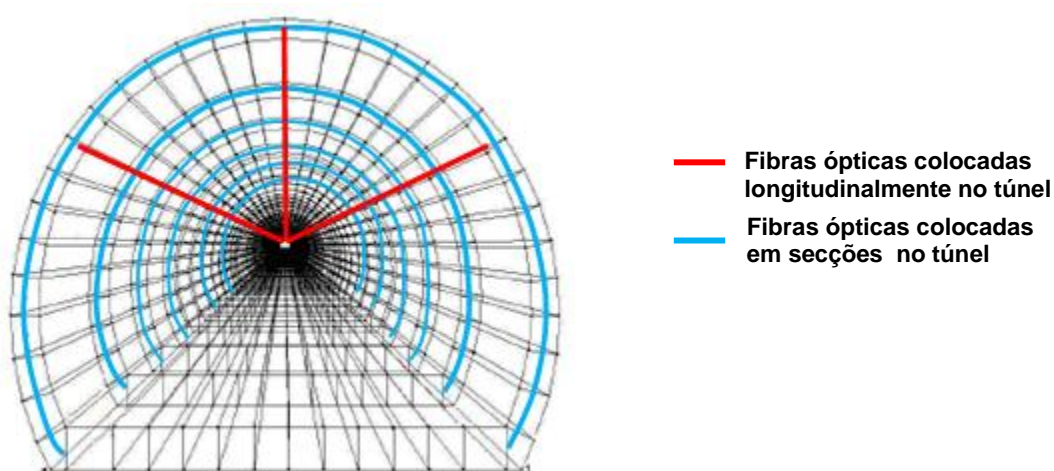
Garantidas as condições mínimas de segurança foi possível fazer uma inspecção visual ao interior do canteiro, revelando uma rotura do seu hasteal direito, com uma extensão aproximada de cerca de 13,0 m. A inspecção revelou ainda fendas longitudinais e transversais na metade do Caneiro em que a rotura não se verificou (hasteal esquerdo), não tendo sido porém possível verificar qual a extensão real dos danos ocorridos, para além dos cerca de 13,0 m referidos. As dificuldades aumentaram na avaliação da extensão dos danos na laje de soleira, já que o caudal escoado e as precárias condições de segurança não permitiram o aprofundamento da inspecção visual.

O estado de degradação do Caneiro de Alcântara poderia ter sido evitado, através da observação do seu comportamento. A instrumentação permite um acompanhamento da evolução de patologias.



A instrumentação de galerias subterrâneas, incluindo o Caneiro de Alcântara, é de difícil execução devido aos acessos. As leituras dos sensores convencionais têm de ser realizadas junto ao sensor para além de que são pontuais, não permitindo fazer um controlo ao longo de toda a galeria.

Os sensores de fibra óptica abrem novas perspectivas para este tipo de infra-estruturas, pois permitem um acompanhamento contínuo sem necessidade de leituras no local, ou seja, torna possível obter medições contínuas longitudinais e transversais das galerias através de uma monitorização remota (figura 7.2).



**Figura 7.2 – Esquematização de sensores de fibras ópticas num túnel.**

Actualmente, estas galerias não são monitorizadas. Os sensores de fibra óptica permitem fazer medições das convergências por secções, tais como já são efectuadas em túneis onde é possível o seu acesso com sensores convencionais ou com sensores de fibra óptica. Nestes casos, à excepção do período de instalação dos cabos, o acesso não é necessário para as leituras, o que é uma vantagem deste sistema pois, para além de permitir uma monitorização remota, apresenta resistência e robustez ao ambiente agressivo envolvente.

Para além da possibilidade da instalação de sensores nas secções, os cabos de fibra óptica podem ser colocados ao longo da galeria. Desta forma, é possível detectar o aparecimento de deformações em qualquer ponto do túnel, contrariamente ao sistema que até hoje se utiliza em túneis, de instrumentação por secções.

Neste tipo de estrutura, poderiam ser utilizados sensores distribuídos ou redes de Bragg para a medição de extensões. Permitem a determinação de deformações, de forma contínua, por grandes distâncias, apresentando estabilidade a longo tempo.

## **7.2. Medição de movimentos de juntas e de extensões ao longo de galerias de barragens**

A medição de movimentos de juntas e de extensões ao longo de galerias de uma barragem pode ser efectuada com recurso a sensores de fibras ópticas, permitindo uma monitorização contínua e remota. Os sensores de fibra óptica em rede de Bragg afiguram-se constituir uma boa opção.

A Barragem de Varosa está situada em Amacave (INAG, s. d.), concelho de Lamego distrito de Viseu, na bacia hidrográfica do Douro, no rio Varosa (figura 7.3). É uma barragem de betão em arco, com uma altura acima do terreno natural de 76 m. Foi concluída em 1976, sendo concebida para fins de produção de energia.



**Figura 7.3 – Barragem de Varosa (INAG, s. d.).**

A barragem possui três galerias. Na figura 7.4 apresenta-se um esquema de uma galeria com uma possível instalação de sensores de fibra óptica. Os sensores de fibra óptica em rede de Bragg permitem uma monitorização por segmentos. Assim é possível determinar quais os segmentos em que se pretende observar o

comportamento das juntas da galeria bem como também de extensões ao longo da mesma, através de uma única fibra.

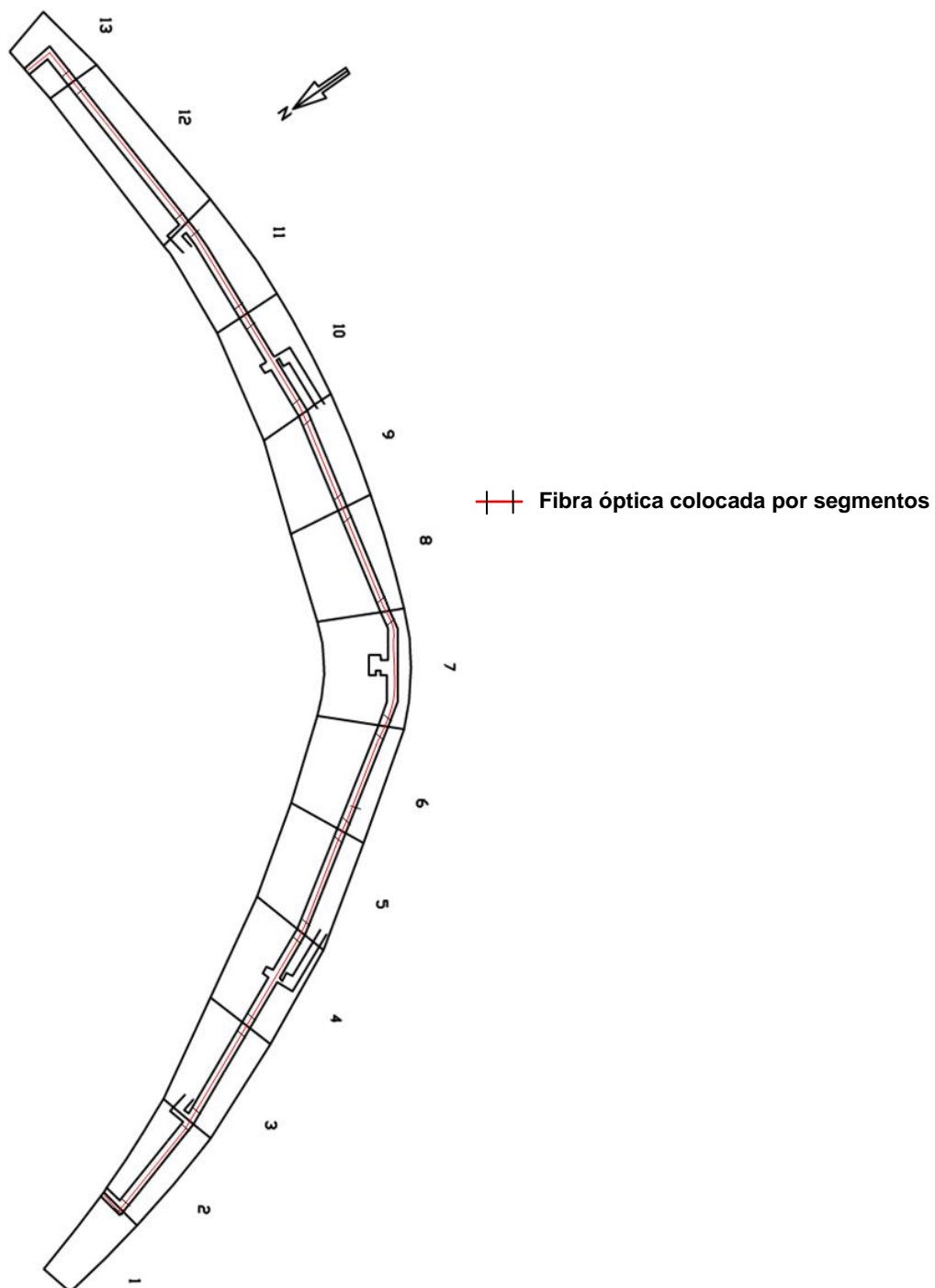


Figura 7.4 – Galeria da barragem (adaptado de INAG, s. d.).

### **7.3. Medição de movimentos de juntas e de fissuras nos paramentos de montantes de barragens**

A medição de juntas e de fissuras no paramento montante de barragens é de difícil execução apresentando custos elevados. Actualmente, a única forma de se proceder a uma observação do paramento montante é através de inspecções visuais, recorrendo ao auxílio de mergulhadores ou quando se efectua o esvaziamento da albufeira. A observação de fissuras e juntas submersas é difícil, sendo o esvaziamento da albufeira um processo dispendioso só justificado em determinadas circunstâncias (reparação de órgãos hidráulicos ou para fazer face a anomalias de comportamento que ponham em causa a segurança).

Os sensores de fibra óptica permitem observar o comportamento das fissuras e juntas do paramento montante de uma barragem de betão ou de enrocamento com cortina de betão a montante. A sua resistência ao ambiente envolvente, nomeadamente ao facto de estar submerso, torna este tipo de sensores ideais para a sua instrumentação.

Os sensores de fibra óptica têm de ser instalados numa das seguintes fases:

1. No final da construção, antes do enchimento da albufeira;
2. No esvaziamento da albufeira, no caso de a barragem já estar em serviço.

Seguidamente apresentam-se dois tipos de barragens onde este método pode ser empregue:

#### *i. Barragem do Alto Lindoso*



**Figura 7.5 – Barragem do Alto Lindoso (INAG, s. d.).**



A barragem do Alto do Lindoso (INAG, s. d.), situada em Lindoso, concelho de Ponte da Barca, distrito de Viana do Castelo, está situada na bacia hidrográfica do rio Lima (figura 7.5). É uma barragem abóbada de dupla curvatura em betão com uma altura acima da fundação, de granito, de 110 m. Esta barragem foi concluída em 1992 e foi projectada para a produção de energia.

A medição de movimentos de juntas e de fissuras no paramento montante da barragem, poderia ser efectuada como se ilustra na figura 7.6.

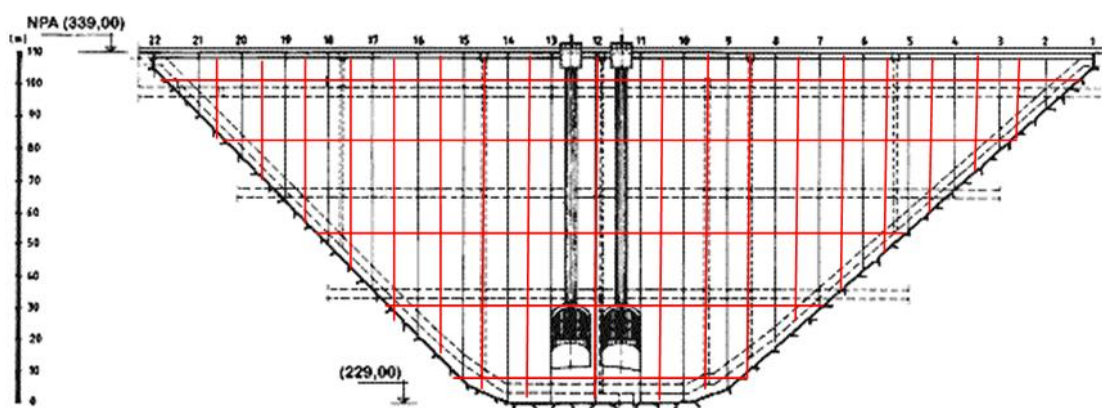


Figura 7.6 – Vista do paramento montante da barragem Alto Lindoso com os cabos de sensores de fibra óptica distribuídos para a medição de extensões nas juntas e nas fissuras (adaptado de INAG, s. d.).

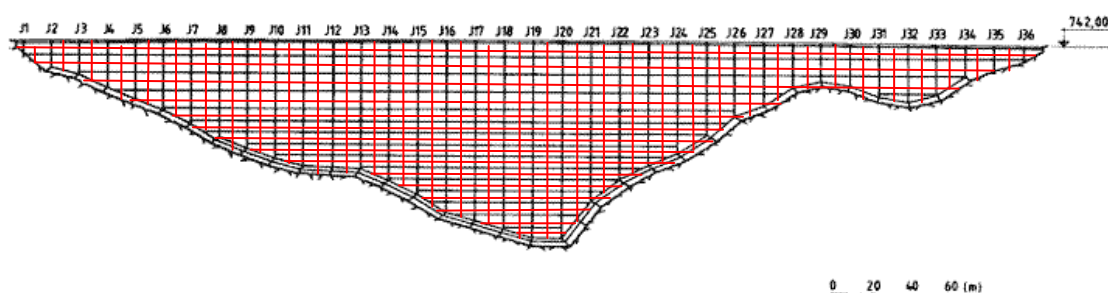
## ii. Barragem de Paradela



Figura 7.7 – Barragem de Paradela (INAG, s. d.).

A barragem de Paradela (INAG, s. d.), situada em Paradela, concelho de Montalegre, distrito de Vila Real, está situada na bacia hidrográfica do Cávado no rio Cávado (figura 7.7). É uma barragem de enrocamento lançado a granel com uma cortina de betão a montante, com uma altura acima da fundação de granito de 120 m. Esta barragem foi concluída em 1956 e foi projectada para a produção de energia.

A ter sido prevista no final da fase de construção (o que não teria sido viável dado que os sensores de fibra óptica ainda não existiam) a instalação de sensores distribuídos deve ser efectuada sobre a cortina de betão de forma análoga à de uma barragem em betão. Na figura 7. 8, observa-se como se deveriam instalar os cabos de fibra óptica.



**Figura 7.8 - Vista do paramento montante da barragem de Paradela com os cabos de sensores de fibra óptica distribuídos para a medição de extensões instalados (adaptado de INAG, s. d.).**

Note-se, que as imagens apresentam apenas uma ilustração de um exemplo de aplicação, não devendo os locais de instalação dos cabos de fibra óptica entendidos como correspondendo a uma definição concreta do respectivo subsistema de observação.

Com uma rede de sensores, conforme a disposição apresentada na figura 7.6 e 7.8, é possível monitorizar remotamente as juntas do betão e o aparecimento de fendas e deformações.

Em ambos os casos, nas barragens de betão ou de enrocamento com cortina a montante de betão, os cabos das fibras ópticas devem ser colocados perpendicularmente às juntas a medir. Assim, é possível fazer uma monitorização das juntas e de eventuais fendas que possam surgir em todo o paramento montante da barragem.

## 8. Considerações finais

A importância da observação do comportamento de uma obra geotécnica, desde a fase de construção até ao final da fase de serviço, foi a inspiração para esta tese. Ela foca a observação de obras geotécnicas através de uma tecnologia recente, os sensores de fibra óptica. O acompanhamento de novas estruturas e das existentes é uma ferramenta essencial para uma moderna e eficiente gestão de infra-estruturas.

Nos últimos anos, os sensores de fibra óptica consolidaram o seu papel na monitorização estrutural e, em particular, na engenharia geotécnica e civil. O aparecimento de novas e diferentes tecnologias de sensores e, a sua constante evolução, contribuíram fortemente para este facto.

Os sensores de fibra óptica apresentam várias vantagens relativamente aos sensores convencionais, nomeadamente:

- Pequenas dimensões;
- Permitem a medição de vários parâmetros;
- Multiplexagem distribuída;
- Insensíveis às perturbações externas;
- Confiáveis a longo prazo em ambientes exigentes;
- Monitorização remota a longas distâncias;
- Compatível com a rede de transmissão de dados.

As três características a destacar nos sensores de fibra óptica como provável razão do seu sucesso presente e futuro, são: a estabilidade das medições, o potencial a longo prazo de confiabilidade das fibras, bem como a possibilidade da realização de medições distribuídas e remotas.

Os sensores de fibra óptica mais utilizados em obras geotécnicas são:

- Sensores pontuais (Fabry-Perot e Michelson);
- Sensores quase distribuídos (Fibra de redes de Bragg);
- Sensores distribuídos (Raman, Brillouin ou microdobragem).

As principais grandezas físicas a medir são a temperatura e extensão. Os sensores pontuais permitem apenas medições localizadas, apresentando um custo inferior relativamente aos outros sensores. Os sensores quase distribuídos e os sensores distribuídos permitem medições contínuas ao longo de toda a obra. As redes de Bragg

combinadas com a possibilidade de multiplexagem e os sensores distribuídos de Brillouin ou Raman contínuas ao longo de barragens, taludes, túneis e, também, em pontes e infra-estruturas ferroviárias.



## Referências Bibliográficas

- AMORIM, A. & PINTO, J. (2002). "*Abertura Numérica de uma Fibra Óptica*". Departamento de Física Instituto Superior de Engenharia do Porto. Consultado em Outubro de 2008. <http://www.defi.isep.ipp.pt/~asv/isep/fisica3/4016.pdf>
- ARAÚJO, F. M.; DIAS, I.; FERREIRA, L. A.; FRAZÃO, O.; SANTOS, J. L. (s. d.). "*Sensores de Bragg em Fibra Óptica*". Departamento de Física. Faculdade Ciências da Universidade do Porto. Consultado em Novembro de 2008. [http://www.deetc.isel.ipl.pt/jetc05/JETC99/pdf/art\\_53.pdf](http://www.deetc.isel.ipl.pt/jetc05/JETC99/pdf/art_53.pdf)
- ASAWA, C. K. & Yao, S. K. (1983). "*Fiber Optical Intensity Sensors*". IEEE J. of Sel. Areas in Communication, SAC-1(3), 1983.
- BARBOSA, C. L.; CAZO, R. M.; HATTORI, H. T.; LISBÔA, O. & RABELO, R. C.(2000). "*Sensor de Deformação Usando Grades de Bragg*". Revista Científica Periódica – Telecomunicações. Volume 3. Nº 2.
- BASTOS, M. J. (1998). "*A Geotecnia na Concepção, Projecto e Execução de Túneis em Maciços Rochosos*". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Georrecursos – Área de Geotecnia. Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- BERGMEISTER, K.; DEL GROSSO, A.; INAUDI, D. & SANTA, U. (s. d.). "*Monitoring of Bridges and Concrete Structures with Fibre Optic Sensors in Europe*". Consultado em Janeiro de 2009. <http://www.smartec.ch/Bibliography/PDF/C92.pdf>
- BORTONI, E. C.; CRAVEIRO, M.A.; MOLINA, R.V. & TAKAHASHI, R. (2007). "*Tecnologias de Sensores Ópticos para o Monitoramento de Pontos Quentes em Transformadores*". 12º Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ. Consultado em Dezembro de 2008. [http://www.rmreng.com.br/Artigo\\_ERIAC.pdf](http://www.rmreng.com.br/Artigo_ERIAC.pdf)
- BRAGA, A. M.; REGAZZI, R. D.; RIBEIRO, A. S.; SILVA, L. C.; TRIQUES, A. & VALENTE, L. C. (2002). "*Técnicas de Leitura para Sensores de Fibra Óptica Baseados em Redes de Bragg*". Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. Consultado em Novembro de 2008. <http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE226.PDF>

- BRUNNER, F. K. (2004). "*Fibre Optic Sensors: An Overview*". 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom. Consultado em Agosto de 2008. [http://www.fig.net/nottingham/proc/ts\\_06\\_1\\_brunner.pdf](http://www.fig.net/nottingham/proc/ts_06_1_brunner.pdf)
- CAROME, E. F.; DAVIS, C. M.; EINZIG, R.E.; EZEKIEL, S. & WEIK, M. H. (1986). "*Fiber optic sensors technology handbook*". Optical Technologies - A Division of Dynamic System INC. Consultado em Outubro de 2008. <http://www.scribd.com/doc/9790015/Instrumentation-Fiber-Optic-Sensor-Technology-Handbook>
- CARVALHO, S. (2007). "*Instrumentação Geotécnica*". Relatório de Estágio, licenciatura em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- CASANOVA, N. & INAUDI, D. (1998). "*SOFO: Tunnel Monitoring with Fiber Optic Sensors*". Consultado em Dezembro de 2008. <http://www.smartec.ch/Bibliography/PDF/C23.pdf>
- CASPURRO, I. M. (1999). "*Observação do Comportamento de Obras Geotécnicas Rodoviárias*". Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Geologia de Engenharia, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- COSTA, A. (s. d.). "*Características de Transmissão: Atenuação e Dispersão*". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Consultado em Agosto de 2008. [http://paginas.fe.up.pt/~hsalgado/co/como\\_03\\_atenuacaoedispersao.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~hsalgado/co/como_03_atenuacaoedispersao.pdf)
- CULSHAW, B. & DAKIN, J. (s. d.). "*Optical fiber sensors-Principles and components*". Vol.I. Artech House, Boston.
- CUNHA, A. P. & FERNANDES, J. G. (1980) "*Observação de Obras Subterrâneas*". GEOTECNIA – Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 1980 Nº 28.
- DINIS DA GAMA, C. (s. d.). "*Novos Desenvolvimentos sobre o Método Extensométrico para Monitorizar Convergências em Túneis*". Centro de Geotecnia, Instituto Superior Técnico.
- DOYLE, C. (2003). "*Fibre Bragg Grating Sensors - An Introduction to Bragg Gratings and Interrogation Techniques*". Smart Fibers. Consultado em Novembro de

2008.

<http://www.smartfibres.com/Attachments/Smart%20Fibres%20Technology%20Introduction.pdf>

DUQUE, F. (s. d.). “Fibra óptica”. Consultado a dia 27 de Outubro de 2008.  
<http://pwp.netcabo.pt/filipe.duque/fibraoptica.htm>

FARHADIROUSHAN, M.; KIM, J. Y.; KIM, Y. S.; KLUTH, R.; LEE, S. U.; PARK, D. S. & WATLEY, D. (s. d.). “*Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) by Using Optic Fibre*”. Consultado em Janeiro de 2009.  
[http://www.sensornet.co.uk/files/article/Sensornet\\_Case\\_Studies\\_on\\_Distributed\\_Temperature\\_and\\_Strain\\_Sensing\\_\(DTSS\).pdf](http://www.sensornet.co.uk/files/article/Sensornet_Case_Studies_on_Distributed_Temperature_and_Strain_Sensing_(DTSS).pdf)

FIALHO, J. L. (1969). “*Análise Experimental de Tensões*”. Volume II. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

FIBERSENSING (s. d.). Consultado em Agosto de 2008.  
[http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM\\_PaginaId=29269](http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=29269)

FRAZÃO, O.; MARQUES, A. T.; OLIVEIRA, R. & RAMOS, C.A. (2007). “*Aplicação de Sensores em Fibra Óptica Embebidos para a Monitorização de Estruturas Compósitas*”. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Volume 14, Páginas 89-97

GHOLAMZADEH, B. & NABOVATIA, H. (2008). “*Fiber Optic Sensors*”. Engineering and Technology Volume 32 August.

GLISIC, B. & INAUDI, D. (2006). “*Integration of distributed strain and temperature sensors in composite coiled tubing*”. SPIE, Smart Structures and Materials Conference. Consultado em Dezembro de 2008.  
<http://www.smartec.ch/Bibliography/PDF/C138.pdf>

GOFF, D. R. & HANSEN, K. S. (2002). “*Fiber Optic Reference Guide*”. A Practical Guide to Communications Technology”. Edition: 3. Edição da Focal Press.

GOWAR, J. (1993). “*Optical Communication Systems*”. (2 nd ed). New York, Prentice Hall International Series in Optoelectronics.

HECHT, E. (1987). “*Optics*”. Wesley Publishing Company, inc.

IENTILUCCI, E. (1993). “*Fundamentals of Fiber Optics*”. Consultado em Outubro de 2008. <http://www.cis.rit.edu/~ejipci/Reports/FiberOptics.pdf>

- INAG (s. d.). "*Barragens de Portugal*". Consultado em Janeiro de 2009.  
[http://cnpqb.inag.pt/gr\\_barragens/gbportugal/index.htm](http://cnpqb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/index.htm)
- INAUDI, D.; OKAMOTO, T. & SUMITRO, S. (2004). "*Intelligent Sensory Technology for Health Monitoring Based Maintenance of Infrastructures*". Consultado em Janeiro de 2009. <http://www.smartec.ch/Bibliography/PDF/C116.pdf>
- INAUDI, D. (2004). "SOFO Sensors for Static and Dynamic Measurements". 1<sup>st</sup> FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004. Consultado em Dezembro de 2008.  
[http://www.fig.net/nottingham/proc/ts\\_06\\_2\\_inaudi.pdf](http://www.fig.net/nottingham/proc/ts_06_2_inaudi.pdf)
- INAUDI, D. (2005). "Overview of fibre optic sensing to structural health monitoring applications". International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Consultado em Janeiro de 2009.  
<http://www.smartec.ch/Bibliography/PDF/C127.pdf>
- INAUDI, D. (2009). "*Apresentação Sistemas de Monitorização Estrutural*". Palestra em Fevereiro de 2009, LNEC.
- ISCTE (s. d.). Acetatos 9 da disciplina "Sistemas de Telecomunicações Guiadas". Consultado em 23 de Outubro de 2008.  
<http://radio.lx.it.pt/STG/STG0405acetatos9.pdf>
- JOHANSSON, S. & SJÖDAHL, P. (2004). "*Downstream Seepage Detection using Temperature Measurements and Visual Inspection – Monitoring Experiences from Røsvatn Field Test Dam and Large Embankment Dams in Sweden*". Consultado em Novembro de 2008.  
<http://www.sensornet.co.uk/download.cfm?type=document&document=56>
- JOKISALO, T. (2006). "*Fiber Optic Sensing in Lightweight Structures*". Helsinki University of Technology. Department of Mechanical Engineering. Aeronautical Engineering. Consultado em Outubro de 2008.  
[www.aeronautics.hut.fi/edu/theses/full\\_thesis/Jokisalo\\_Tuomo\\_2006.pdf](http://www.aeronautics.hut.fi/edu/theses/full_thesis/Jokisalo_Tuomo_2006.pdf)
- LAGOKOS, N.; LITOVITZ, L.; MACEDO, P. & MOHR, R. (1981). "*Multimode Optical Fiber Displacement Sensor*". Appl. Opt., Vol. 20, p. 167, 1981.

- LAMAS, P. (2008). “*Apontamentos da disciplina de “Movimento de Terrenos e Estabilidade de Taludes”*”. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- LIMA, C. (2002). “*Introdução às Fibras Ópticas*”. Consultado em Novembro de 2008. <http://www.clubedohardware.com.br/artigos/371>
- LOPES, M. L. & MENDONÇA, A. (1998). “*Instrumentação e Observação de Taludes Reforçados com Geossintéticos*” GEOTECNIA – Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 1998 Nº 84
- MOREIRA, F. S. (2005). Instituto Politécnico de Bragança. Consultado em Setembro de 2008. [http://www.ipb.pt/~fmoreira/Ensino/Ondas/Ondas\\_04\\_05\\_cap5.pdf](http://www.ipb.pt/~fmoreira/Ensino/Ondas/Ondas_04_05_cap5.pdf)
- OFSETH - Optical Fibre Sensors Embedded into technical Textile for Healthcare (s. d.). “*Optical fibre sensors: principles and state of the art*”. Consultado em Outubro de 2008. [http://www.ofseth.org/IMG/pdf/OFSETH\\_D1\\_2\\_Annex1.pdf](http://www.ofseth.org/IMG/pdf/OFSETH_D1_2_Annex1.pdf)
- PASCAL (1990). “*Precision Interferometer*”. Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Models OS-9255A thru OS-9258A. Consultado em Novembro de 2008. [http://www.saddleback.edu/AP/mse/phys/4C\\_labs/Physis%20c%20labs%20PDF/interferometer.pdf](http://www.saddleback.edu/AP/mse/phys/4C_labs/Physis%20c%20labs%20PDF/interferometer.pdf)
- PEREIRA, R. J. (2008). “*Fibras ópticas e WDM*”. Consultado em Outubro de 2008. [http://www.gta.ufri.br/grad/08\\_1/wdm1/index.html](http://www.gta.ufri.br/grad/08_1/wdm1/index.html)
- PINTO, P. S. (s. d.). “*Algumas Reflexões Sobre a Instrumentação de Estruturas Geotécnicas*”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil & Universidade de Coimbra. Consultado em Janeiro de 2009. <http://www.sochige.cl/material/L.Reflexiones%20sobreInstrumentacion%20de%20Estruturas%20Geotecnicas.Junho2006.pdf>
- PUC – Pontificada Universidade Católica do Rio de Janeiro (s. d.). “*Instrumentação e Segurança de Barragens*”. Consultado em Dezembro de 2008. [http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG\\_0599.EXE/4244\\_3.PDF?NrOcoSis=9236&CdLinPrg=pt](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-bin/PRG_0599.EXE/4244_3.PDF?NrOcoSis=9236&CdLinPrg=pt)
- RAMOS, P. & XAVIER, B. (2006). “*Realce de uma Contenção Periférica em Parede Moldada Inerente à Reparação de um Troço do Caneiro de Alcântara*”. 10º Congresso Nacional de Geotecnia, 22 a 26 de Maio de 2006.

- REINHARD, J. (2000). "*Fundamentals of Fiber Optics – An Introduction for Beginners*". Consultado em Setembro de 2008. [http://www.machinevisiononline.org/public/articles/Volpi\\_FiberOpticsRevAa.PDF](http://www.machinevisiononline.org/public/articles/Volpi_FiberOpticsRevAa.PDF)
- RIBEIRO, A. B. (1996). "*Esquemas de Multiplexagem de Sensores de Fibra Óptica*". Dissertação para a obtenção do grau de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- RSB, Regulamento de Segurança de Barragens (2007). D.R. Nº 344/2007 publicado no Diário da Republica 1ª Série – N.º198 – 15 de Outubro.
- SANGUANPONG, S. (2000). "*Fiber Optic Fundamentals*". Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Kasetsart da Tailândia. Consultado em Setembro de 2008. <http://www.cpe.ku.ac.th/~nguan/presentations/datacom/fiber.pdf>
- SENSORNET (s. d.). "Dynamic integrity monitoring of railway lines". Case Studies. Consultado em Agosto de 2008. [http://www.sensornet.co.uk/module/page-240/zone-1/casestudy\\_id-23/case\\_studies\\_action-view\\_casestudy/](http://www.sensornet.co.uk/module/page-240/zone-1/casestudy_id-23/case_studies_action-view_casestudy/)
- SENSORNET (s. d.). "*Embankment dam safety highlighted in Sweden*". Case Studies. Consultado em Agosto de 2008. [http://www.sensornet.co.uk/module/page-240/zone-1/casestudy\\_id-8/case\\_studies\\_action-view\\_casestudy/](http://www.sensornet.co.uk/module/page-240/zone-1/casestudy_id-8/case_studies_action-view_casestudy/)
- SENSORNET (s. d.). "*Gas Pipeline Leak Detection*". Case Studies. Consultado em Setembro de 2008. [http://www.sensornet.co.uk/module/page-240/zone-1/casestudy\\_id-28/case\\_studies\\_action-view\\_casestudy/](http://www.sensornet.co.uk/module/page-240/zone-1/casestudy_id-28/case_studies_action-view_casestudy/)
- SILVA GOMES, A. & GUEDES DE MELO, F. (1993). GEOTECNIA – Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 1993 Nº 68
- WIKIPÉDIA (s. d.). "*Optical Fiber*". Consultado em Outubro de 2008. [http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_Fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_Fiber)
- YU, S. T. Francis & YIN Shizhuo (2002). "*Fiber Optic Sensors*". Consultado em Setembro de 2008. <http://books.google.pt/books?id=TOyOLKuULIUC&printsec=frontcover#PPA42,M1>

## Glossário

**Abertura Numérica** - o ângulo máximo com que a luz é aceite e propagada para o eixo de uma fibra que traduz a capacidade de recolha da luz de uma fibra.

**Absorção** - atenuação óptica na fibra resultante da conversão de potência óptica em calor, causada por impurezas.

**Acoplamento** – combinação ou separação de sinais ópticos.

**Alargamento** – Aumento no comprimento de onda provocando erros na leitura do sinal.

**Amplificador** - dispositivo, inserido numa via de transmissão, que aumenta o nível de um sinal óptico ou electrónico, podendo ser colocado logo após o transmissor (poder impulsor), a uma distância entre o transmissor e o receptor (amplificador na linha), ou um pouco antes do receptor (pré-amplificador).

**Amplitude** - é uma medida escalar não negativa da magnitude de oscilação de uma onda.

**Ângulo crítico** – menor ângulo de incidência em que ocorre reflexão interna total, designado também por abertura numérica.

**Ângulo de aceitação** – metade ângulo do cone de aceitação, dentro do qual a luz incidente é totalmente reflectida no interior do núcleo da fibra óptica.

**Ângulo de incidência** - ângulo entre um raio incidente sobre a fibra óptica e a linha perpendicular ao perfil da fibra.

**Ângulo de reflexão** – ângulo que um feixe luminoso reflectido faz com a superfície que o reflecte.

**Ângulo de refacção** - ângulo de desvio que um feixe luminoso sofre ao passar pela superfície que separa dois meios com índices de refacção diferentes.

**Atenuação** – perda gradual da intensidade do feixe luminoso ao longo de uma fibra óptica, devido a absorção e dispersão, expressa em dB/Km.

**Byte** – é uma unidade básica de medição de armazenamento de informações em ciências da computação.

**Circuitos digitais** - circuitos electrónicos que baseiam o seu funcionamento na lógica binária, em que toda a informação é guardada e processada sob a forma de zero (0) e um (1).

**Coerente (emissão)** – transmissão de um sinal sem perda de informação.

**Comprimento de onda** - distância entre valores repetidos num padrão de uma onda, é representado pela letra grega lambda ( $\lambda$ ); numa onda sinusoidal o comprimento de onda é a distância entre picos.

**Cone de aceitação** – define um ângulo segundo o qual toda a radiação incidente é transmitida para a fibra óptica.

**Conteúdo espectral** - é o resultado obtido quando as radiações electromagnéticas são emitidas nos seus comprimentos de onda ou frequências correspondentes.

**Corpo negro** – corpo que absorve toda a radiação que nele incide: nenhuma luz o atravessa nem é reflectida.

**Decibel (dB)** – é uma medida da razão entre duas quantidades, sendo usado para uma grande variedade de medições em acústica, física e electrónica. O decibel é muito usado na medida da intensidade de sons. É uma unidade de medida adimensional, semelhante à percentagem.

**Díodo** – é um semiconductor que permite que a corrente eléctrica tenha apenas uma direcção de fluxo. Os díodos utilizados em fibra óptica incluem emissores de luz (LED's e díodos laser) e detectores (fotodíodos).

**Dispersão** - o espalhamento temporal de um sinal luminoso de ondas electromagnéticas numa fibra óptica que viajam a diferentes velocidades. O exemplo mais corrente da dispersão é provavelmente um arco-íris, em que a dispersão provoca a separação espacial de uma luz branca em diferentes componentes da onda (cores diferentes).

**Dispersão de Rayleigh** – dispersão de energia radiante pelo contacto ou interacção com as partículas em suspensão, como poeira ou humidade. Pode resultar de impurezas dentro de uma fibra óptica que cria pequenas refacções em comparação com a transmissão da onda sem impurezas.



**Dispersão intermodal** – ocorre em fibras multimodais; o sinal é espalhado no tempo, porque a velocidade de propagação do sinal óptico não é a mesma para todos os modos.

**Dispersão intramodal** – é o resultado da velocidade de grupo ser função do comprimento de onda (a velocidade de grupo é a velocidade com que a energia de modo viaja na fibra). Este efeito é tanto mais pronunciado quanto maior a largura espectral da fonte.

**Dopagem** – adição de impurezas químicas elementares, com a finalidade de dotá-los de propriedades de semicondutor controlado específico.

**Efeito fotoelástico** – propriedade que certos materiais transparentes possuem de, quando submetidos a um estado de deformação, exibirem um fenómeno de dupla refacção.

**Eixo** – recta que passa pelo centro da fibra óptica em rotação sobre esta recta.

**Emanações** – acções pelas quais as substâncias voláteis abandonam, no estado gasoso, os corpos que as continham.

**Emissão incoerente** – transmissão de um sinal com perda de informação.

**Equações de Maxwell** - conjunto de quatro equações diferenciais parciais que descrevem as propriedades dos campos eléctrico e magnético e as relacionam com as suas fontes, densidade de carga e densidade de corrente.

**Fase** - fase de uma oscilação ou de uma onda é a fracção de um ciclo completo correspondente a um deslocamento a partir de um ponto de referência de determinado tempo  $t = 0$ .

**Feixe luminoso** – é uma estreita projecção de luz a partir de uma fonte de energia radiante.

**Fluorescência** - capacidade de uma substancia de emitir luz quando exposta a radiações do tipo raios ultravioleta (UV), raios catódicos ou raios X. As radiações absorvidas (invisíveis a olho humano) transformam-se em luz visível.

**Fotodetector** – detector sensível à acção da luz e das radiações.

**Fotoemissor** – o meio (normalmente LED ou laser) utilizado para converter um sinal eléctrico num correspondente sinal óptico.

**Fotoionização** – efeito de libertação de electrões devido à presença de fotões.

**Frequência** - grandeza física ondulatória que indica o número de revoluções (ciclos, voltas, oscilações, etc) por unidade de tempo. Alternativamente, pode-se medir o tempo decorrido para uma oscilação. Este tempo em particular recebe o nome de período (T). Desse modo, a frequência é o inverso do período. A unidade de medida mais utilizada é o Hertz (Hz), corresponde ao número de oscilações por segundo.

**Frequência de modulação** – é uma técnica de modulação que faz com que as ondas variem em frequência ou número de ciclos por segundo (Hertz): cada frequência pode codificar um sinal e uma outra frequência codifica o outro.

**Gallium arsenide (GaAs)** - componente composto por dois elementos gálio e arsénico que são dos mais importantes semicondutores usados em micro-electrónica.

**Geometria óptica** - descreve os fenómenos luminosos através da geometria.

**Germânio** –elemento químico de símbolo Ge.

**Giroscópio** – dispositivo de medição ou para manter a orientação, baseado nos princípios do movimento angular.

**Guia de feixes luminosos** – estrutura condutora ou dieléctrica capaz de suportar e propagar um ou mais padrões de campo electromagnético.

**Índice de refração (n)** - A relação entre a velocidade da luz no espaço livre e velocidade da luz numa fibra, sempre maior ou igual a um.

$n = C/v$        $c$  - velocidade da luz no vácuo.

$v$  - velocidade do mesmo comprimento de onda na fibra material.

**Intensidade** – fluxo de energia por unidade de tempo.

**Interferência inter-simbólica** – num sistema de transmissão digital, a distorção do sinal recebido, que se manifesta no espalhamento temporal e consequente sobreposição de cada um dos impulsos para o grau que o receptor não consegue distinguir entre mudanças de estado, ou seja, entre os diversos elementos sinal. Em um determinado limiar, interferência inter-simbólica irá comprometer a integridade dos dados recebidos.

**Interferência da luz** – modificação ou destruição de um sinal no percurso entre o emissor e o receptor.

**Interferómetro** - equipamento que utiliza o princípio da interferência de ondas electromagnéticas para fins de medição.

**Largura de banda** – expressa a quantidade de informações que um sistema tem capacidade de transportar. Em sistemas analógicos, é a diferença entre as frequências máxima e mínima que podem ser transportadas.

**Laser** – é um dispositivo que produz radiação electromagnética com características muito especiais: ela é monocromática (possui frequência muito bem definida) e coerente (possui relações de fase bem definidas), além de ser colimada (propaga-se como um feixe).

**LED** – é um diodo semiconductor que, quando energizado, emite luz visível, sendo, por isso, designado por LED (Diodo Emissor de Luz). A luz não é monocromática (como num laser), mas consiste numa banda espectral relativamente estreita e é produzida pelas interacções energéticas do electrão.

**Lei de Snell – Descartes** – resume-se a uma expressão que descreve a relação entre o ângulo de incidência e o de refacção da luz, quando passa por uma fronteira entre dois meios diferentes.

**Luz** - região do espectro electromagnético que pode ser percebida pela visão humana, designado espectro visível, e cobre nominalmente gama de comprimentos de onda de 0,4 a 0,7 micrómetros. Nos campos de comunicação óptica e de laser, é costume estender o uso do termo para incluir a porção do espectro electromagnético que pode ser tratada por técnicas ópticas utilizadas para o espectro visível.

**Luz evanescente** - luz guiada na parte interna de um revestimento de fibra óptica, e não no núcleo, ou seja, a porção de onda da luz que penetra do núcleo para o revestimento.

**Microdobragem** - causas de atenuação incremental numa fibra óptica.

**Modos de propagação** – existem duas formas para a propagação duma onda de um ponto emissor a um ponto receptor. Uma é conhecida como propagação guiada e está tipicamente associada à propagação em cabos (fibras ópticas). A outra é conhecida como propagação no espaço. Na propagação guiada, a onda está confinada a um espaço limitado e a trajectória da sua propagação é a trajectória seguida pelo canal físico (guia de onda) que a suporta.

**Monocromático** - é a radiação produzida por apenas uma cor (em rigor, de apenas um comprimento de onda).

**Multiplexagem** – transmissão simultânea de dois ou mais sinais ao longo de um canal de comunicação comum.

**Natureza dieléctrica** – material que possui alta resistência ao fluxo da corrente eléctrica.

**Polarização** - propriedade de ondas que descreve a orientação das suas oscilações.

**Radiação electromagnética** - são ondas que se auto-propagam pelo espaço, algumas das quais são percebidas pelo olho humano como luz. A radiação electromagnética compõe-se de um campo eléctrico e um magnético, que oscilam perpendicularmente um ao outro e à direcção da propagação de energia. A radiação electromagnética é classificada de acordo com a frequência da onda, que em ordem crescente da duração da onda são: ondas de rádios, microondas, radiação terahertz (Raios T), radiação infravermelha, luz visível, radiação ultravioleta, Raios-X e Radiação Gama.

**Razão sinal/ruído** – Rácio entre o valor do sinal que contem a informação e o valor do ruído exterior e intrínseco do meio de transmissão.

**Receptor** – recebe a informação e descodifica-a, isto é, transforma os impulsos físicos (sinais) em mensagem recuperada.

**Reflexão interna total** – fenómeno óptica que ocorre quando um feixe luminoso encontra a bainha segundo um ângulo superior ao ângulo crítico.

**Reflexões** – mudança da direcção de propagação do feixe luminoso

**Refracção** - é a mudança de direcção e velocidade que ocorre quando a luz passa de meio para outro. Cada meio possui capacidade própria quanto à refração da luz, caracterizada pelo seu índice de refração.

**Regenerador** – através da combinação de um receptor e um transmissor, efectua a transformação do sinal óptico em eléctrico e posteriormente reconverte-o num sinal óptico regenerado.

**Resistência (eléctrica)** – é a capacidade de um corpo se opor à passagem de corrente eléctrica, quando existe uma diferença de potencial aplicada.

**Ritmo binário** - toda a informação é guardada e processada sob a forma de zero (0) e um (1).

**Semicondutores** – são sólidos cristalinos de condutividade eléctrica intermediária entre condutores e isolantes. Os elementos semicondutores podem ser tratados quimicamente para transmitir e controlar uma corrente eléctrica.

**Taxa de amostragem** – valor do tempo em que devem ser retiradas amostras do sinal a transmitir; para que o sinal continue coerente deve ser no mínimo o dobro da frequência do sinal.

**Tensão eléctrica** – Diferença de potencial entre dois pólos que originam a corrente eléctrica.

**Velocidade de comutação** – valor para o qual os elementos electrónicos estão preparados para gerar um sinal digital.